



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



OPTIMALIZACE SVAŘENCE PŘÍČNÝCH SANÍ ZAKLADAČE HYDRAULICKÉHO LISU

Bakalářská práce

Studijní program: B2341 – Strojírenství
Studijní obor: 2302R022 – Stroje a zařízení
Autor práce: **Jakub Pašek**
Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

OPTIMIZATION OF TRANSVERSE SLIDE WELDMENT OF HYDRAULIC PRESS SHUTTLE

Bachelor thesis

Study programme: B2341 – Engineering
Study branch: 2302R022 – Machine and Equipment
Author: **Jakub Pašek**
Supervisor: doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.



Tento list nahradíte
originálem zadání.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vzta-huje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto pří-padě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elek-tronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Anotace

Práce je zaměřena na použití analýzy metodou konečných prvků v prostředí PTC Creo 2.0 při optimalizaci ocelového svařence použitého ve výrobních linkách pro výrobu součástí automobilů. Jsou zde vysvětleny principy tvorby potřebných náhradních modelů a je zde také provedeno porovnání jejich výsledků.

Klíčová slova: **Analýza metodou konečných prvků, PTC Creo 2.0, optimalizace**

Číslo práce: **KTS-B075**

Anotation

The work is focused on using of finite elements analysis in PTC Creo 2.0 environment for optimization of steel weldment which is used in automotive production lines. The principles of creation of needed replacement models are described and either the comparison of these models is involved.

Klíčová slova: **Finite elements analysis, PTC Creo 2.0, optimization**

Work number: **KTS-B075**

Poděkování

Tímto děkuji konzultantům a všem pracovníkům z firmy Benteler za ochotu pomoci při řešení problému. Zároveň děkuji doc. Bílkovi za trpělivost a odborné vedení v průběhu práce, všem lidem z katedry textilních a jednoúčelových strojů, kteří přispěli k dokončení této práce, a na závěr rodině, která mě velmi podporovala po celou dobu studia.

Obsah

Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Seznam použitých zkratk.....	8
Seznam použitých značek.....	8
1 Úvod.....	9
2 Popis výrobní linky	10
2.1 Rozložení linky.....	10
2.2 Popis vysokorychlostního kartézského zakladače.....	11
2.2.1 Osa Y– nosník	11
2.2.2 Vozík os Y-Z	12
2.2.3 Osa Z.....	13
2.2.4 Osa X.....	14
2.2.5 Člunek.....	14
3 Analýza metodou konečných prvků	15
3.1 Metoda konečných prvků	15
3.1.1 Porovnání analytické metody s MKP.....	16
3.1.2 Modelování	16
3.2 Software PTC Creo 2.0.....	16
3.2.1 Tvorba sítě.....	17
3.2.2 Porovnání skutečného a náhradního modelu nosníku	17
4 Citlivostní studie topologie nosníku	18
4.1 Skořepinový model.....	18
4.1.1 Model zatížení skořepinového modelu.....	21
4.1.2 Skořepinový model původního řešení (varianta 0).....	23
4.1.3 Skořepinový model varianty 1.....	24
4.1.4 Skořepinový model varianty 2.....	26
4.1.5 Skořepinový model varianty 3.....	29
4.1.6 Porovnání výsledků analýz skořepinových modelů	31
4.2. Objemový model.....	34
4.2.1 Výsledky analýz objemových modelů pro všechny varianty	35
4.2.2 Porovnání výsledků analýz objemových a skořepinových modelů	40
Závěr	41
Seznam použitých zdrojů	42

Seznam použitých zkratk

Angl. – anglicky
 CAD – Computer Aided Design
 FEA – Finite Element Analysis
 HW – Hardware
 KP – Konečné prvky
 MKP – Metoda Konečných Prvků
 Obj. - Objemový
 Obr. – Obrázek
 PSS – Původní souřadnicový systém
 PTC – Parametric Technology Corporation
 SS – Souřadnicový systém
 SW – Software
 Tab. – Tabulka

Seznam použitých značek

Značka	Popis veličiny	Jednotky
A	Šířka profilu	mm
B	Výška profilu	mm
B_s	Výška profilu spodního nosníku	mm
C	Tloušťka stěny profilu	mm
C_z	Tloušťka stěny profilu žebra	mm
y	Vzdálenost středu žebra od středu soustavy	mm
F	Síla	N
g	Normální tíhové zrychlení; $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$	m.s^{-2}
m	Hmotnost modelu – softwarově vypočtená z definované hustoty materiálu a objemu	kg
Δ_x	Posunutí uzlu oproti původnímu umístění ve směru $x \rightarrow$ deformace ve směru x	mm
Δ_z	Posunutí uzlu oproti původnímu umístění ve směru $z \rightarrow$ deformace ve směru z	mm
Δ_c	Celkové posunutí uzlu oproti původnímu umístění \rightarrow celková deformace	mm
i	Číslo varianty	-
Δ_c/Δ_{c0}	Poměrný přírůstek celkové deformace varianty i k deformaci původního řešení	%
Δ_x/Δ_{x0}	Poměrný přírůstek deformace ve směru X varianty i k deformaci původního řešení	%
Δ_z/Δ_{z0}	Poměrný přírůstek deformace ve směru Z varianty i k deformaci původního řešení	%
m/m_0	Poměrný přírůstek hmotnosti modelu varianty i ke hmotnosti původního řešení	%

1 Úvod

Tato práce si klade za úkol zanalyzovat současné řešení hlavní nosné části (dále jen nosník) vysokorychlostního kartézského zakladače platin (dále jen zakladač) zkonstruovaného firmou Benteler Maschinenbau Liberec s.r.o. (dále jen Benteler), zejména z pohledu tuhosti. Dále po provedení příslušných studií pomocí metody konečných prvků se vybere nejvhodnější varianta konstrukce této části a zrealizuje se ve formě výrobních výkresů nových řešení nosníku. Výpočtová část práce bude probíhat v prostředí modulu Simulate programu PTC Creo 2.0.

Zakladač je automatizovaný manipulátor se třemi stupni volnosti, jehož pracovní rychlosti se pohybují kolem 5 m.s^{-1} . Dva tyto zakladače jsou součástí linky na výrobu plechových součástí do automobilů, která využívá technologie lisování za tepla. Jejich úloha je přemístění plechu z válečkového dopravníku na výstupu z homogenizační pece do formy lisu, resp., po vylisování dílu, jeho přemístění na další dopravník, který díl dopraví k balící části linky. Nosníkem je zde míněna hlavní nosná část tohoto zakladače, která setrvává ve statické poloze, a na které jsou pomocí lineárních vedení uchyceny pohyblivé části zakladače.

Současné řešení nosníku je zkonstruováno na základě zkušeností konstruktérů z firmy Benteler jako ocelový svařenec z obdélníkových profilů, plechů a pásů, jenž se následně obrábí. Toto řešení je již standardně využíváno v celé řadě linek vyprojektovaných firmou Benteler a funguje dle požadavků. Nicméně v této práci budou rozebrány možnosti zlepšení současného řešení nosníku z pohledu zvyšování tuhosti, přičemž se budou sledovat změny hmotnosti. Zvýšení tuhosti by pak mělo pro výrobu tyto přínosy: Zvýšení přesnosti výroby a potlačení vibrací zakladače. Zadavatel přitom hledí na zvyšování hmotnosti nosníku jako na přípustný jev. Jádrem práce bude spočívat ve vymodelování náhradního modelu nosníku, na kterém se provedou strukturální analýzy a následně citlivostní studie. Nejlepší výsledky se v závěru přepracují do složitějších modelů a porovnají se mezi sebou z výše uvedených hledisek.

Přestože se zakladač pohybuje vysokými rychlostmi, bude k této úloze přistupováno jako ke statické úloze, neboť výsledky citlivostních studií se budou porovnávat s výsledky analýzy stávajícího řešení, tudíž lze sledovat pouze trendy změn tuhosti a hmotnosti a není třeba dbát na přesnost absolutních hodnot výsledků, které budou zřejmě odlišné od reality. Zatížení nosníku bude tedy bráno pouze z působení tíhy těles, které jsou k nosníku uchyceny, a které budou v modelu napoložovány v nejméně příznivé konfiguraci z pohledu zatížení.

V následující, teoretické části bude podrobněji popsán celek linky s důrazem kladeným na zakladač, a dále v praktické části bude zmíněn postup tvorby náhradního modelu a získávání výsledků.

2 Popis výrobní linky

Výrobní linka, jejíž součástí je i předmět této práce, je z velké části automatizovaná linka určená k lisování plechů za tepla. Jak již bylo řečeno, těchto funkčních linek vyprojektovaných firmou Benteler existuje ve světě několik desítek. Liší se v různých specifikacích, ale principiálně fungují stejně. Jsou to linky, na jejichž vstup je dopraven polotovar – z plechu vyříznutý obrys rozvinu hotového výrobku, a dále na výstupu je poté hotový výrobek přemístěn na paletu a připraven k zabalení. Tyto výrobky pokrývají široké spektrum možných plechových výlisků v automobilovém průmyslu, např. části karoserie automobilu, palubní desky a další. Práce člověka na této lince spočívá v dopravě polotovarů na vstup linky, resp. v dopravě hotových výrobků z výstupu linky na expedici. Proces tepelného zpracování plechů je zcela automatizován, stejně jako doprava plechů z pece do lisu a z lisu na výstupní dopravník linky. Tuto dopravu do a z pece zajišťuje právě vysokorychlostní kartézský zakladač. Celá kapitola 2 je vypracována s pomocí dokumentace firmy Benteler (1).

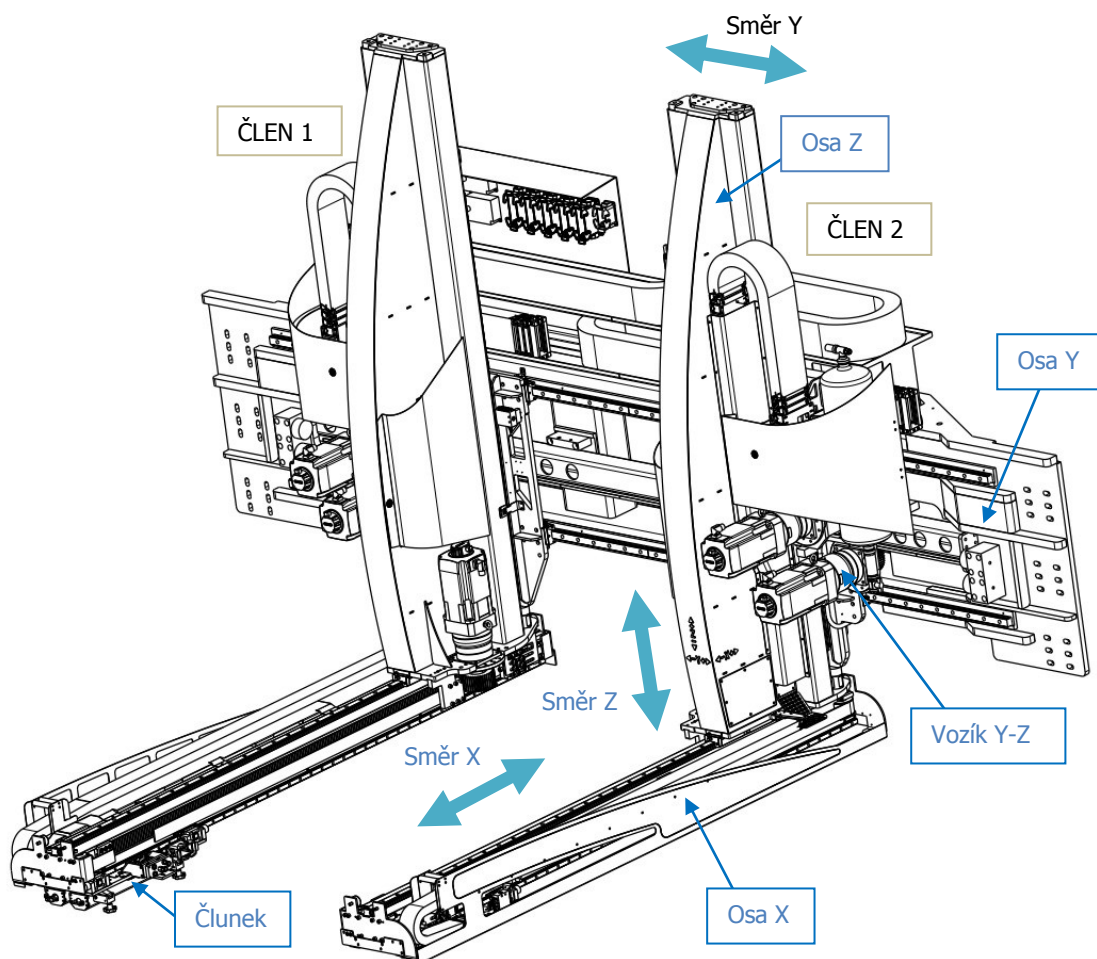
2.1 Rozložení linky

Vstup linky je tvořen takzvaným nádražím, do nějž jsou dopraveny palety s polotovary. V současné době mohou být obsluhována 4 tato nádraží najednou. Dopravu polotovarů z nádraží na vstupní válečkový dopravník pece zajišťují robotická ramena s uchopovacím zařízením. Dále následuje ohřev materiálu v homogenizační peci, která může být dlouhá až 32 metrů. Jednotlivé linky mají různé specifikace pecí, tudíž nemá cenu je zde zaznamenávat. Polotovary zahřáté na pracovní teplotu jsou dále dopraveny z výstupního válečkového dopravníku pece pomocí magnetického uchopovacího zařízení, zavěšeném na zakladači, do formy lisu, kde jsou následně vytvarovány do finální podoby.

Na lisu jsou pomocí šroubů zavěšeny dva tyto zakladače. Jeden zajišťuje dopravu polotovarů z výstupu pece do lisu a druhý, umístěný zrcadlově na opačném konci lisu zajišťuje dopravu výlisků z lisu na výstupní dopravník linky nebo předání výrobku robotům. Výstupní dopravník linky, potažmo roboty pak dopraví tyto výlisky ven z linky, kde je čeká zabalení na paletách.

2.2 Popis vysokorychlostního kartézského zakladače

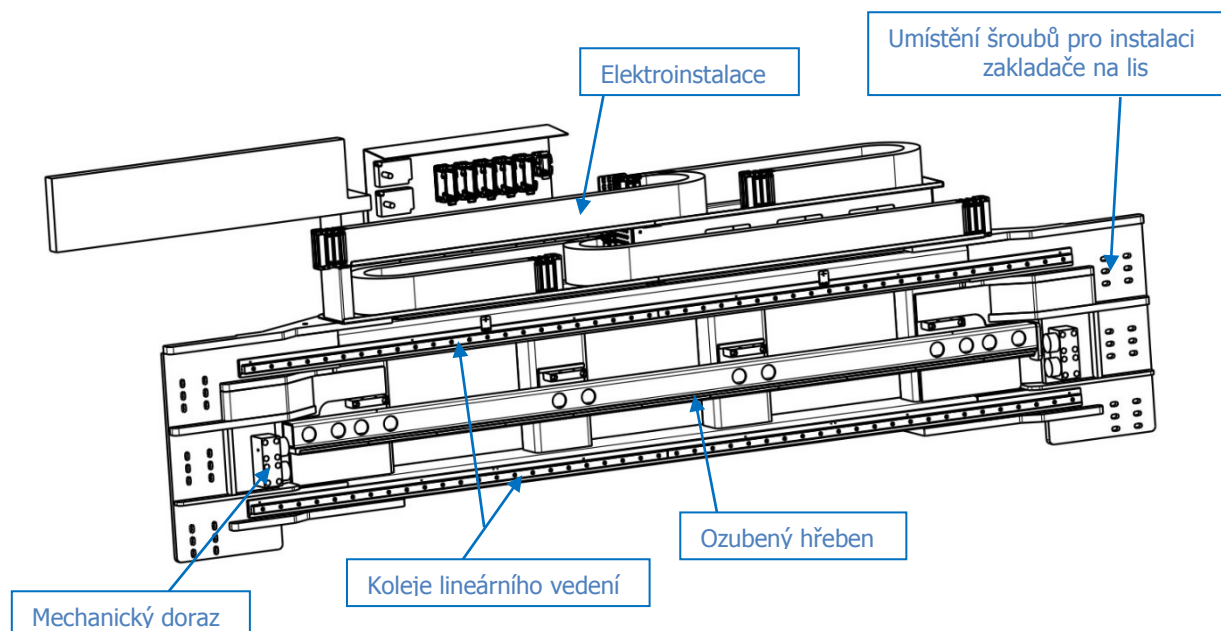
Zakladač se skládá ze dvou členů schopných nezávislého pohybu, jež jsou zavěšeny na ose Y pomocí dvou lineárních vedení. Každý z těchto členů je vybaven těmito částmi: Vozík Y-Z, osa Z, osa X, člunek. Všechny části jsou mezi sebou spojeny pomocí lineárních vedení a poháněny servopohony Siemens.



Obr. 1: Model zakladače s popisky částí.

2.2.1 Osa Y – nosník

Jako hlavní nosný prvek zakladače, zajišťuje tato masivní konzole dostatečnou tuhost pro jeho dynamický pohyb. Nosník se montuje na lis přímo pomocí šroubů. Je zde umístěna elektroinstalace a rozdělovače mazání do zbytku zakladače. Konzole je dále osazena 2 lineárními vedeními a ozubeným hřebenem, což umožňuje pohyb vozíku ve směru osy Y. Mechanické dorazy na obou koncích konzole brání vyjetí vozíku Y-Z z kolejnic vedení.

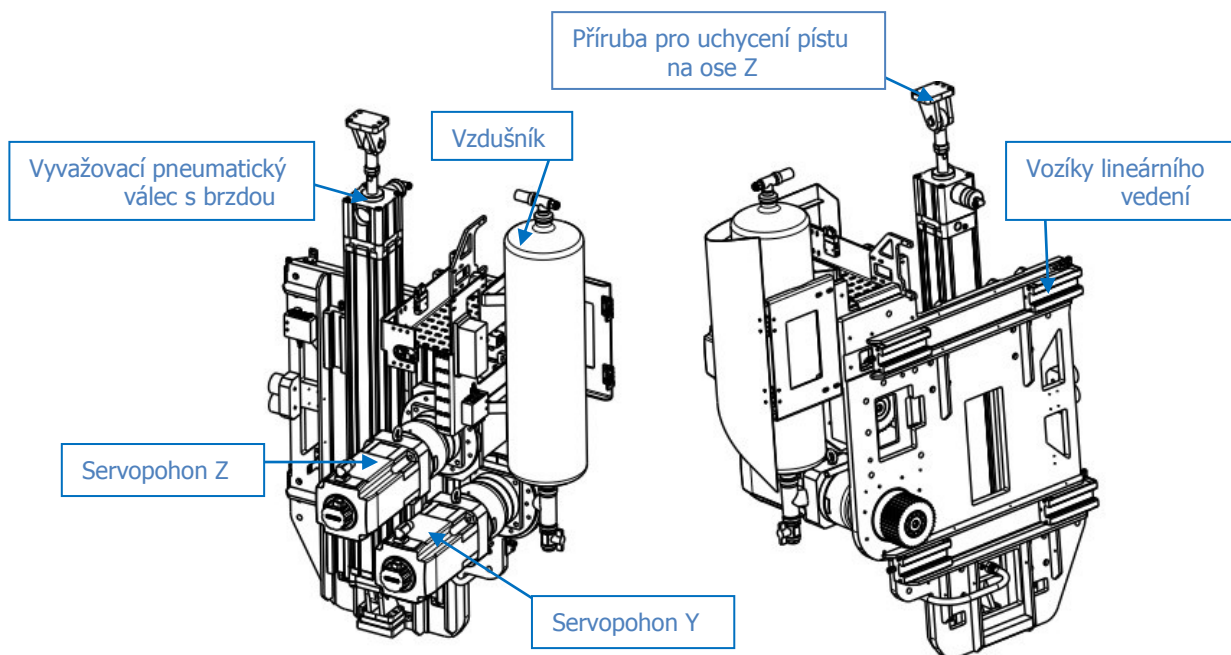


Obr. 2: Model osy Y s popisky jednotlivých částí.

2.2.2 Vozík os Y-Z

Vozík Y-Z je osazen 8 vozíky lineárního vedení, které umožňují jeho pohyb ve směrech os y a z . Tento pohyb zajišťuje dvojice nezávislých servopohonů s planetovými převodovkami. Dále je na vozíku umístěn okruh vyvažování s pneumatickým válcem a vzdušníkem, elektroinstalace a rozdělovače maziva pro vozíky lineárního vedení.

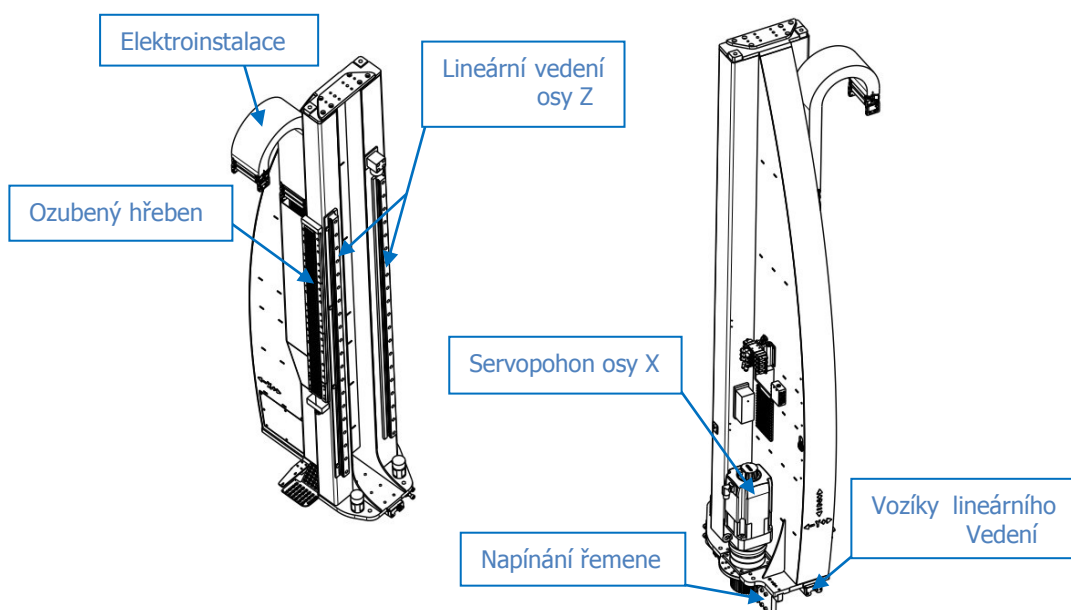
Pneumatický válec zde plní funkci kompenzace hmotnosti členu zakladače, čímž snižuje namáhání servopohonu pro osu Z . Jeho další funkcí je zabrzdění členu ve statické poloze pomocí vestavěné pneumatické brzdy. Válec je uchycen na vozíku Y-Z a jeho píst na vrchní části osy Z .



Obr. 3: Vozík Y-Z s popisky jednotlivých částí.

2.2.3 Osa Z

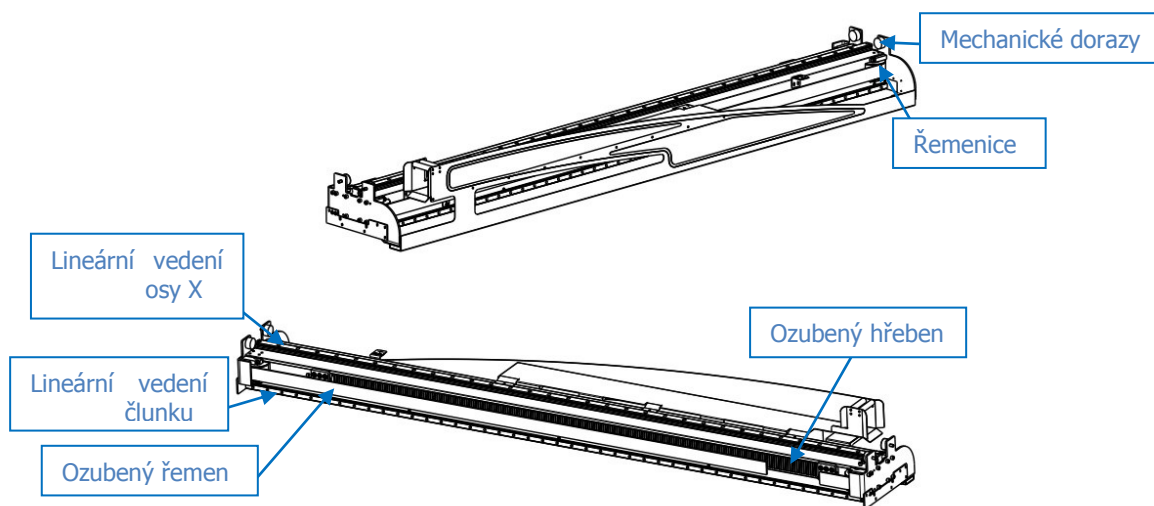
Hlavní prvek člena zakladače je svařenec osy Z. Ten je osazen elektroinstalací, kolejnicemi lineárního vedení v ose Z, ozubeným hřebenem pro přenos hnacích účinků ze servopohonu pro osu Z na vozíku Y-Z. Dále čtyřmi vozíky lineárního vedení umožňujícími pohyb v ose X, servopohonem osy X (tento motor souběžně pohání ozubený řemen) a napínáním ozubeného řemene, jenž pohání člunek.



Obr. 4: Osa Z s popisky jednotlivých částí.

2.2.4 Osa X

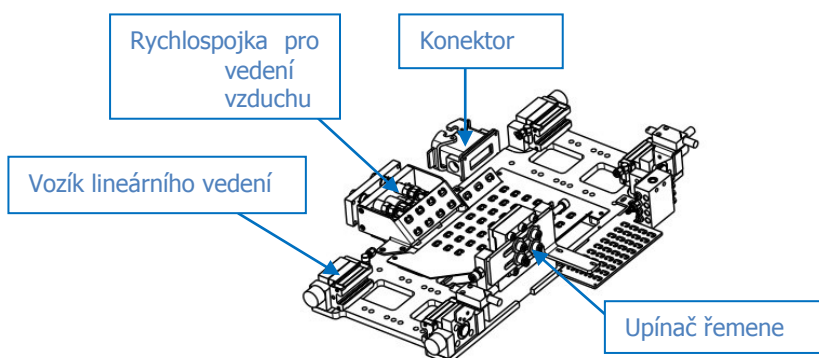
Nosným prvkem osy X je hliníkový profil. Osa X je osazena dvěma řemenicemi na každém konci osy pro vedení řemenu po obvodu osy, lineárním vedením na vrchní ploše osy pro pohyb ve směru X a dvěma lineárními vedeními na boku osy pro pohyb člunku podél osy X. Pro přenos síly ze servomotoru na ose Z na horizontální pohyb osy X slouží ozubený hřeben umístěný na boku osy X. Přenos síly probíhá současně na ozubený hřeben a řemen, čímž se dosahuje současného pohybu osy X i člunku. Na obou koncích osy X jsou umístěny mechanické dorazy, které vymezují maximální rozsah pohybu osy.



Obr. 5: Osa X s popisky jednotlivých částí

2.2.5 Člunek

Člunek slouží k upnutí uchopovacího zařízení, které manipuluje s polotovary a výrobky, k soustavě zakladače. Jeho hlavní část je upínací deska, na kterou jsou šrouby přichyceny ostatní díly člunku, které tvoří: 4 vozíky lineárního vedení, upínač řemenu, rozdělovač maziva, rychlospojka pro vedení vzduchu, konektor pro elektrické signály a upínací rameno k připevnění uchopovacího zařízení na spodní straně člunku.



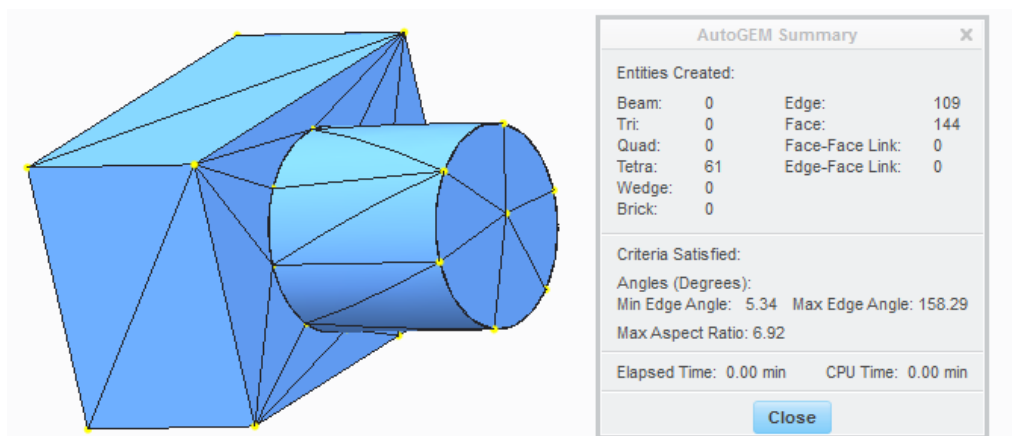
Obr. 6: Člunek s popisky jednotlivých částí.

3 Analýza metodou konečných prvků

3.1 Metoda konečných prvků

Následující text je vyňat a upraven z přednášek Ústavu Konstruování VUT v Brně zpracovaných VRBKOU a VAVERKOU (2). MKP je numerická metoda pro řešení rozsáhlé skupiny konstruktérských problémů a v současnosti má mezi nimi nejsilnější postavení. Tato metoda se používá pro řešení úloh statiky, dynamiky, pružnosti, a její variační formulace k řešení dalších problémů jako: proudění tekutin, vedení tepla, záření, elektromagnetismus, akustika, piezoelektrické děje, mechanika hornin atd.

Tato metoda vyžaduje rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí – prvků. To znamená vytvoření sítě konečných prvků na modelu tělesa určeném k výpočtu. Charakteristické veličiny prvku jsou rozměr, tvar a počet a poloha jeho uzlů. Uzly jsou potom body, ve kterých se potkávají strany nebo hrany prvku, a ve kterých následně hledáme požadované parametry řešení, např. posuvy a natočení, ze kterých se následně výpočty získávají další veličiny, jako napětí, deformační energie aj. Každý prvek má 15 neznámých funkcí proměnných, které se dají interpretovat jako základní veličiny pružnosti. Tyto funkce jsou navzájem propojeny systémem obecných rovnic pružnosti - rovnice rovnováhy, geometrické rovnice a fyzikální rovnice neboli konstitutivní. Na hranici řešené oblasti potom musí být splněny definované okrajové podmínky. Tento soubor parametrů tvoří soustavu lineárních algebraických rovnic, které se zapisují v maticovém tvaru pro potřeby výpočetního systému, a jejich vyřešením následně získáme hledané veličiny. Tyto veličiny jsou přiřazeny k uzlům prvků a tak je získána síť výsledků, kterou je možno převést do různých grafických podob.



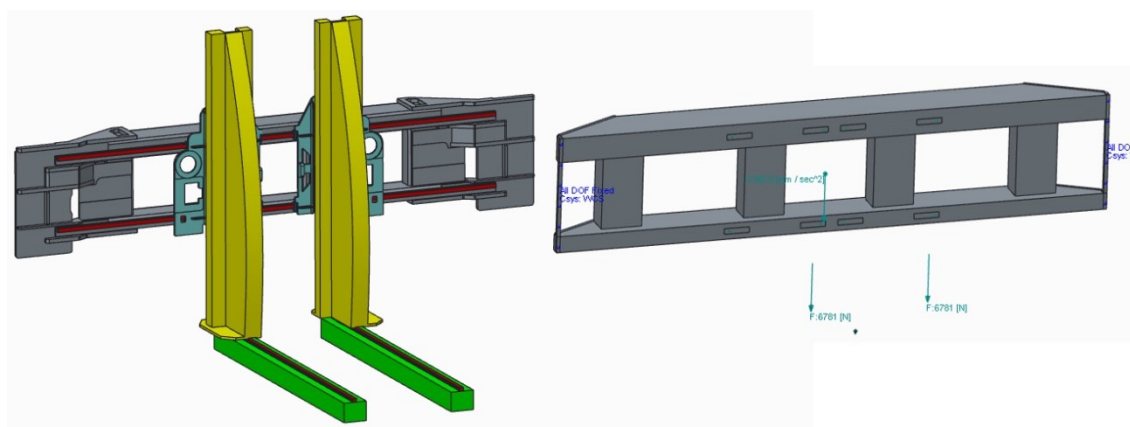
Obr. 7: Síť konečných prvků na jednoduchém modelu.

3.1.1 Porovnání analytické metody s MKP

Analytická metoda řešení problému má oproti MKP výhodu ve spojitém výsledku, nicméně je v praxi možné vyřešit pomocí ní pouze jednodušší úlohy s elementárními tělesy. Oproti tomu MKP nabízí možnost řešení úlohy na libovolně komplikovaných tělesech, přičemž přesnost výsledku závisí na míře shody náhradního modelu s reálným. Výsledky MKP tedy pouze konvergují ke spojitému řešení v závislosti na dokonalosti náhradního modelu. Obecně se dá říct, že model analyzovaný MKP je tužší než reálné těleso. To je jedna z hlavních nevýhod MKP.

3.1.2 Modelování

Reálný geometrický model tělesa a model zatížení je vhodné před rozsítováním upravit tak, aby došlo k výraznému snížení počtu prvků sítě KP. To se dále projeví ve snižování výpočtového času. Zásadní vliv má v tomto ohledu také výkonnost a nastavení HW. Následně získané výsledky je potom nutné kriticky posoudit konstruktérským citem, zda je možné je považovat za řešení úlohy.



Obr. 8: Různá složitost modelů téže soustavy – vpravo je model zatížení gravitační silou od zavěšených částí zakladače nahrazen osamělými silami působícími v těžišti nahrazených těles.

3.2 Software PTC Creo 2.0

Tato práce stojí z velké části na počítačové podpoře, konkrétně na SW Creo 2.0 vyvinutém firmou PTC. Creo je sada programů zahrnujících modul Simulate, nástroj analýzy metodou konečných prvků (angl. FEA), který je použit k usnadnění souběžného konstruktérského přístupu k návrhu, analýze a výrobě strojírenských výrobků. Sada Creo dále obsahuje modul Parametric, využívající balík integrovaných CAD nástrojů pro

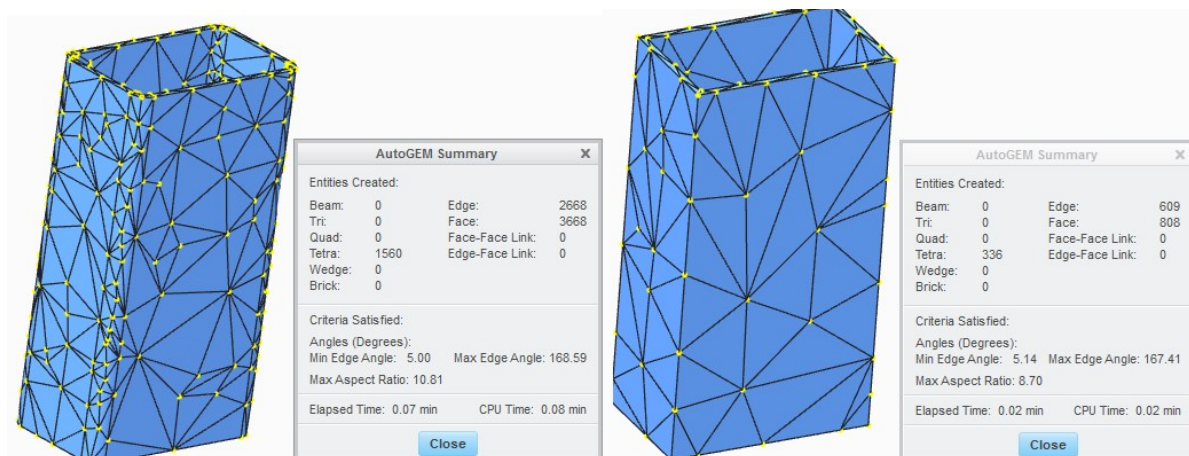
vytváření virtuálních modelů. Creo obsahuje i další zajímavé moduly, které se nicméně v této práci nevyužívají. Text v této kapitole je přeložen a upraven ze zdroje (3).

3.2.1 Tvorba sítě

Creo Simulate umožňuje automatické vygenerování sítě KP. Před každou analýzou program vygeneruje síť podle zadaných parametrů, např. maximální velikost prvku, maximální a minimální velikost úhlu mezi stranami/hranami prvku, max. poměr délky stran/hran prvku apod. Další možností je vygenerování a uložení sítě pomocí nástroje AutoGEM. Pokud je to žádoucí, uložená síť se může použít v následných analýzách. Creo pracuje s tzv. p-metodou adaptivního algoritmu tvorby sítě. Tato metoda spočívá v zachování počtu prvků a v postupném zvyšování polynomiálního řádu prvků dokud nedojde k požadované konvergenci. Konvergence se zadává v procentech a v praxi znamená procentuální změnu veličiny oproti předchozímu kroku analýzy. Ideální je zřejmě stav, kde konvergence nabývá hodnoty 0%.

3.2.2 Porovnání skutečného a náhradního modelu nosníku

Omezujícím faktorem MKP je hardware, na kterém jsou prováděny výpočty. Jeho výkonnost přímo ovlivňuje výpočtové časy, které se mohou pohybovat od několika sekund do několika dnů. Další možnost ovlivnění výpočtového času spočívá ve volbě vhodného náhradního modelu. Skutečný geometrický model obsahuje všechny detaily, které se objevují i na reálném tělese, jako jsou příkladně zaoblené hrany, kontakt plochy s přímkou, drážky s rozměry v řádech milimetrů apod. Při tvorbě sítě konečných prvků rozhodují právě tyto detaily, které zvyšují počet vygenerovaných prvků, což přináší významné prodloužení výpočetních časů. V extrémních případech mohou tyto detaily způsobit zastavení výpočtu. Proto je žádoucí vytvořit takový náhradní model, který bude obsahovat výrazně méně prvků než geometrický model při zachování stejné velikosti prvků.



Obr. 9: Porovnání rozšiřování při odstranění zaoblení.

Z obrázku 3 je patrné, že celkový počet prvků soustavy se s odstraněním detailů z modelů jednotlivých dílů může drasticky změnit. Na obrázku se odstraněním zaoblení z modelu dílu relativně malých rozměrů (obdélníkový profil $250 \times 150 \times 8$ $L=465$) zmenšil počet prvků téměř 5 násobně.

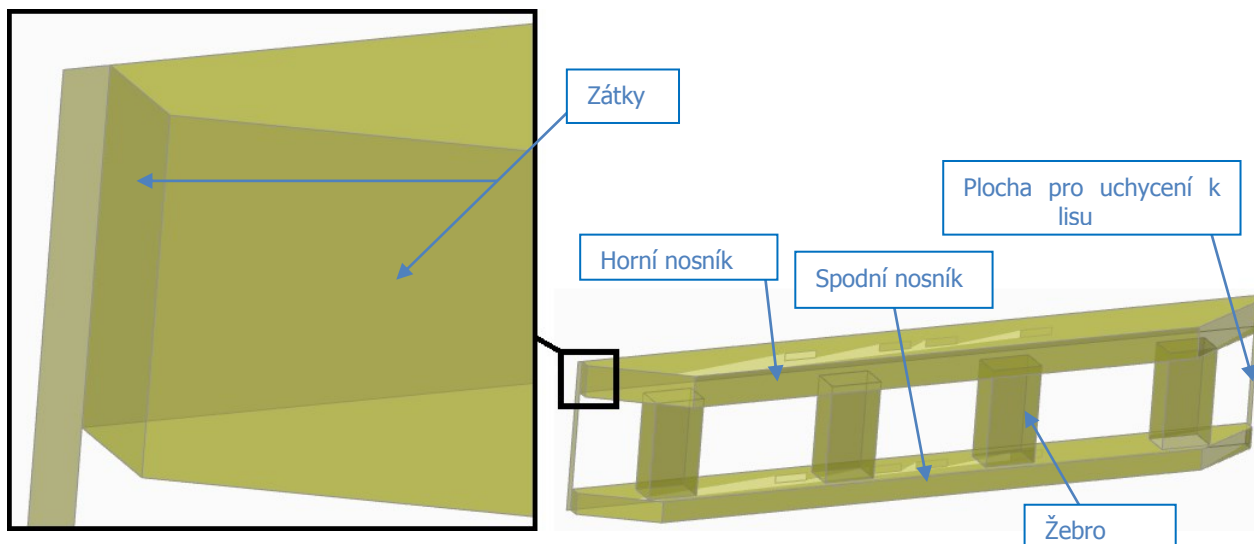
4 Citlivostní studie topologie nosníku

Následující část práce objasní způsoby a postupy, jimiž budou získány konkrétní výsledky řešení. Citlivostní studie jako taková spočívá ve změnách konkrétních rozměrů a topologie modelu, které se zaznamenávají a následně porovnávají s cílem určit optimální hodnoty těchto proměnných.

4.1 Skořepinový model

Časová náročnost výpočtů vedla k nutnosti volby vhodného modelu. Jako takový byl zvolen skořepinový model (Shell). Skořepina spočívá v redukci objemového modelu na model složený pouze z ploch. Modul Simulate přitom počítá dále s celou hmotou modelu, ale tvoří pouze plošné prvky s tvarem trojúhelníku nebo čtyřúhelníku.

Pro vytvoření skořepinového modelu v Creu je nutné mít nejprve objemový model z modulu Parametric s následně definovanými skořepinovými páry (nástroj Shell pair) v modulu Simulate. Přitom je třeba dbát na to, aby plochy skořepin byly mezi sebou spojeny v úsečkách, tudíž aby nedocházelo k přesahu plochy přes okraj jiné (viz. obr. 10).



Obr. 10: Skořepinový model původního řešení s popisky detailem na spojení ploch v jejich okrajových úsečkách.

Kromě převedení objemového modelu na skořepinový bylo z náhradního modelu osy pro účely prvotních analýz odejmuto značné množství vyztužujících prvků a zároveň byly zmenšeny plochy, za něž je nosník uchycen k lisu. Na tyto uchycovací plochy byla použita vazba, zabraňující posuvu i rotaci plochy do všech směrů, což simuluje uchycení pomocí šroubů. Její zvětšování by tak mělo za následek pouze zvýšení počtu prvků, ne však změny ve výsledcích analýz. Proto byla zvolena univerzální šířka této plochy 20 mm pro všechny následující skořepinové modely. Další zachované části jsou: Horní nosník, spodní nosník, žebra a zátky. Odejmuté části se aplikují do modelu při finálních analýzách.

Horní i spodní nosník jsou hlavní nosné části konstrukce a mají vliv převážně na tuhost ve směru Z. Žebra zde figurují jako výtzuhy a zvyšují tuhost ve směru X i Z. Zátky jsou zde aplikovány pro zvýšení torzní tuhosti. Řešení zátek bylo pouze připodobněno k situaci na reálném tělesu.

Hlavní sledovanou veličinou je deformace ve směru X a následně maximální hodnota deformace jako velikost vektoru vzniklého součtem vektorů posunutí do směru X, Y a Z. Δ_x má největší vliv na natočení uchopovacího zařízení zakladače. Deformace nosníku se v místě uchopovacího zařízení znásobuje a to zhruba 5x oproti maximálním deformacím na nosníku. Tato hodnota byla stanovena z vizuálních výsledků v kapitole 4.2. Podle nastavení os ve statické poloze se toto číslo může měnit kvůli změnám velikosti ramen. Na skořepinových modelech byly v této práci získány výsledky pro 45 různých konfigurací nosníků, žeber a zátek.

V následujících kapitolách budou vyobrazeny jen výsledky, vybrané jako optimální. Postup jejich volby se ubíral těmito směry: Nejprve byla provedena analýza původního řešení. Následně bylo přidáno a poté odebráno jedno žebro. Dalším krokem byla citlivostní studie umístění žeber (optimální výsledky v podkapitolách 4.1.3 a 4.1.4). Poté se provedla studie tloušťky stěn žeber pro případ 3, 4 a 5 žeber. Následovalo odzkoušení více variant průřezů horního a spodního nosníku pro model se 3 žebry. Nejlepší výsledek těchto studií byl aplikován pro variantu s 5 žebry. Ukázalo se, že 3 žebra v porovnání se 4 neposkytují dostatečnou tuhost ve směru x, a proto bylo od tohoto řešení upuštěno. Nakonec byla vybrána dále popsaná řešení v souladu s přáními konzultanta firmy Benteler. Jsou to:

- Varianta 1 – Stejný horní i spodní nosník a žebra jako v původním řešení; jsou použita 4 žebra; jiné rozmístění žeber oproti původnímu řešení.
- Varianta 2 - Stejný horní i spodní nosník; žebra mají menší tloušťku stěn oproti původnímu řešení; je použito 5 žeber; jiné rozmístění žeber oproti původnímu řešení.
- Varianta 3 – Stejný profil horního nosníku a žeber jako v původním řešení; spodní nosník má větší průřez než původní; je použito 5 žeber, která jsou zkrácena; stejné rozmístění žeber jako ve variantě 2.

Všechny 3 varianty splňují podmínku větší tuhosti oproti původnímu řešení, avšak liší se poměrem hmot k původnímu řešení. Model varianty 1 má stejnou hmotu, varianty 2 nižší a varianty 3 vyšší.

Varianta	Rozměry profilů	Varianta	Rozměry profilů
0	300x150x8/ 250x100x8/ 4x 250x150x8	23	300x200x8/ 250x150x8/ 3x 250x150x5
1	300x150x8/ 250x100x8/ 4x 250x150x8	24	300x200x8/ 300x100x8/ 3x 250x150x8
2	300x150x8/ 250x100x8/ 5x 250x150x5	25	300x200x10/ 250x100x8/ 3x 250x150x8
3	300x150x8/ 250x150x8/ 5x 250x150x8	26	300x150x8/ 250x150x8/ 3x 250x150x8
4	300x200x10/ 250x150x12/ 3x 250x150x8	27	250x150x8/ 250x100x6/ 5x 250x150x8
5	300x200x10/ 250x150x10/ 3x 250x150x8	28	300x150x8/ 300x100x10/ 3x 250x150x8
6	300x150x8/ 250x150x8/ 5x 250x150x6	29	300x200x8/ 250x100x8/ 3x 250x150x8
7	300x200x10/ 300x100x10/ 3x 250x150x8	30	250x150x6/ 250x100x8/ 5x 250x150x8
8	300x150x8/ 250x150x8/ 5x 250x150x5	31	300x150x8/ 250x100x8/ 3x 300x150x8
9	300x200x8/ 250x150x12/ 3x 250x150x8	32	300x150x8/ 250x100x8/ 4x 250x150x6
10	300x200x8/ 250x150x10/ 3x 250x150x8	33	300x150x8/ 250x100x8/ 4x 250x150x5
11	250x150x8/ 250x100x8/ 5x 250x150x8	34	300x150x8/ 300x100x8/ 3x 250x150x8
12	300x150x8/ 250x100x8/ 5x 250x150x8	35	300x150x8/ 250x100x8/ 3x 250x150x8
13	300x150x8/ 250x150x12/ 3x 250x150x8	36	300x150x8/ 250x100x8/ 3x 250x150x6

14	300x150x8/ 250x100x8/ 5x 250x150x6	37	300x150x8/ 250x100x8/ 3x 250x150x5
15	300x200x10/ 250x150x8/ 3x 250x150x8	38	300x200x6/ 250x100x8/ 3x 250x150x8
16	300x200x8/ 300x100x10/ 3x 250x150x8	39	300x200x6/ 300x100x6/ 3x 250x150x8
17	300x150x8/ 250x150x10/ 3x 250x150x8	40	300x150x8/ 250x150x6/ 4x 250x150x8
18	300x150x8/ 250x100x8/ 4x 250x150x6	41	300x150x8/ 300x100x6/ 3x 250x150x8
19	300x200x10/ 300x100x8/ 3x 250x150x8	42	300x150x8/ 250x150x5/ 4x 250x150x8
20	300x200x8/ 250x150x8/ 3x 250x150x8	43	300x200x6/ 250x150x5/ 3x 250x150x8
21	300x200x8/ 250x150x8/ 3x 250x150x6	44	300x150x8/ 250x150x5/ 3x 250x150x8
22	300x150x8/ 250x100x8/ 4x 250x150x5		

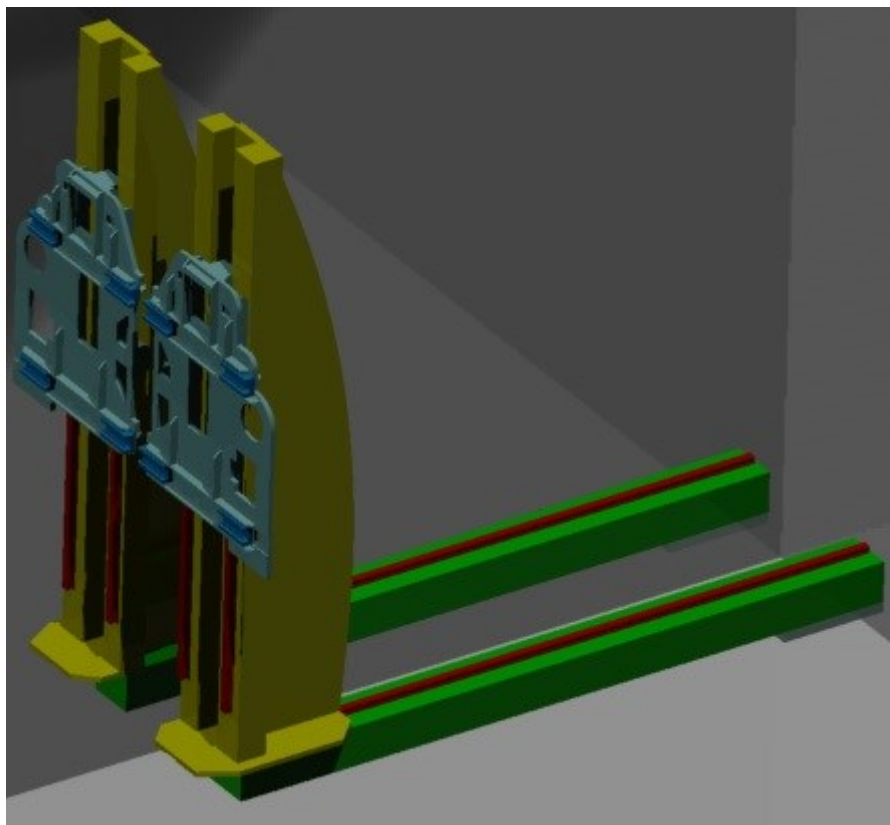
Tab. 1: Číslování variant podle rozměrů profilů v nich použitých. Varianty jsou řazeny dle naměřeného celkového posunutí uzlů od nejmenšího po největší. Rozměry jsou udány jako:

Horní nosník/ Spodní nosník/ počet x žebro.

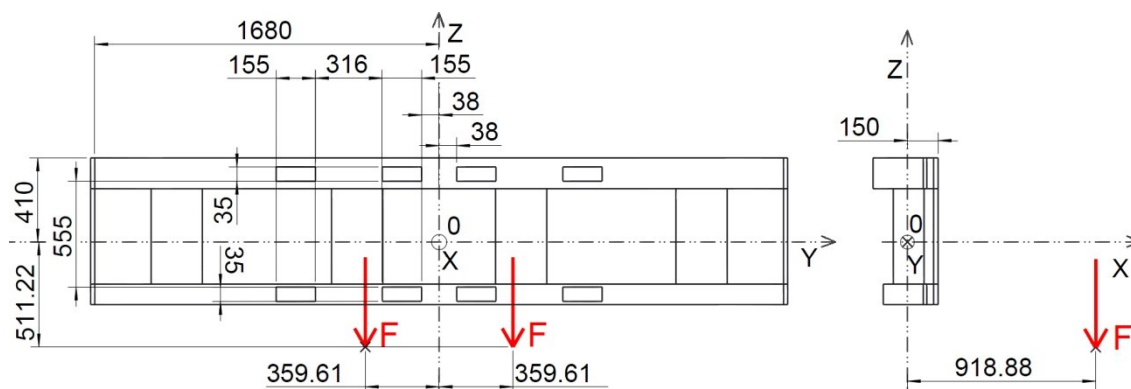
Hodnoty jsou použity v Tab. 9 a Graf 5.

4.1.1 Model zatížení skořepinového modelu

Reálné zatížení nosníku je způsobeno dynamickými silami vyvozenými pohybujícími se částmi zakladače. Vytvořit model takového zatížení by bylo velmi obtížné, navíc by se tím výrazně navýšily výpočetní časy. Další hledisko je jednoduchost modelu, tzn., nemá smysl vytvářet přesný model zatížení na velmi zjednodušený geometrický model. Pro účely sledování trendů změn tuhosti a hmotnosti nosníku bylo stanoveno jako dostačující statické zatížení gravitačními silami působícími v těžišti částí zakladače. Jejich hmotnost byla odměřena ve firmě Benteler prostřednictvím programu DS CATIA. Těmito zjednodušeními ovšem zmizel významný prvek vyztužení konstrukce vozíkem Y-Z, který zvyšuje tuhost celého zakladače. Studie skořepinového modelu se ale zabývá pouze tuhostí nosníku s ohledem na jeho topologii, a proto je možné zde tento prvek vynechat. Následně byl vytvořen geometrický model s umístěním částí zakladače do nejhorší konfigurace z pohledu zatížení (Obr. 11). Z tohoto modelu bylo získáno umístění těžiště vůči původnímu souřadnicovému systému a hmotnost částí. Původní model nemá SS umístěný v těžišti, nýbrž na místě dle Obr. 11. Pro snadnější orientaci v modelech byl takto umístěn i v nových modelech. Samotné zatížení je realizováno dvěma silami působícími v těžišti částí zakladače. Na nosníku pak síly působí na 8 plochách umístěných v místech výskytu vozíků lineárního vedení. Výměra těchto ploch odpovídá ploše řezu lineárního vedení v místě styku vedení s vozíkem (Obr. 12).



Obr. 11: Konfigurace modelů částí zakladače v nejhorším případě z hlediska statického zatížení. Hmoty těchto částí představuje zatížení nosníku.



Obr. 12: Umístění PSS (0), umístění působíště zatěžujících sil vůči němu a plochy, na které síly působí.

Naměřená hmotnost jedné části $m = 690,345 \text{ kg}$;

Síla F působí v místě $[918,88; -359,61; -511,22]$ a $[918,88; 359,61; -511,22]$ a její velikost je

$$F = m \cdot g = 690,345 \cdot 9,80665 = 6769,971 \text{ N}.$$

4.1.2 Skořepinový model původního řešení (varianta 0)

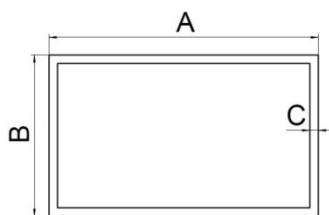
Původní řešení je složeno z těchto profilů:

Horní nosník --> 300x150x8

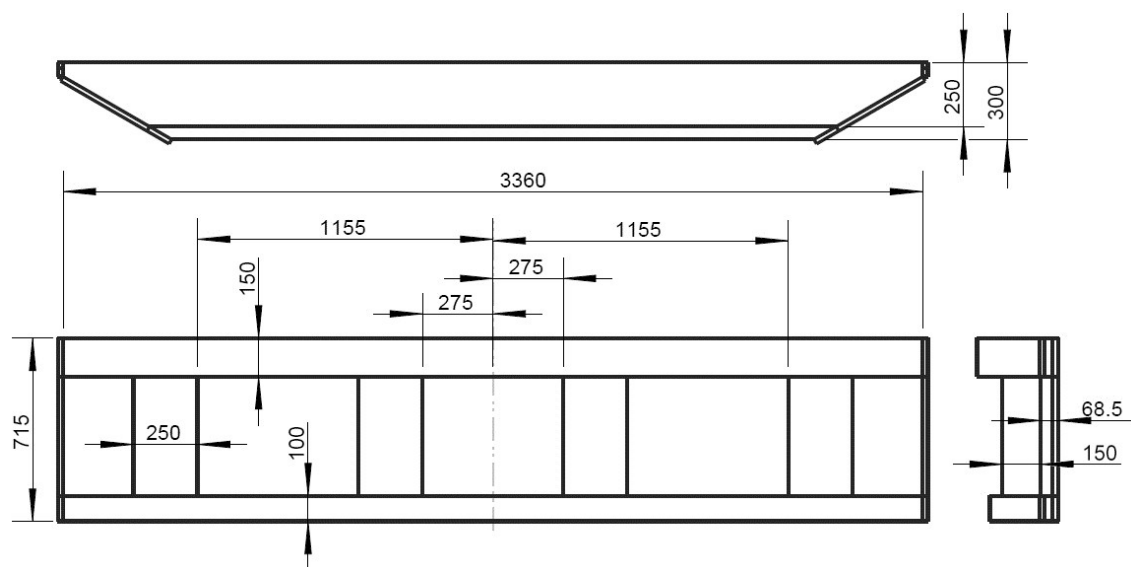
Spodní nosník --> 250x100x8

4x Žebro --> 250x150x8

Značení obdélníkových uzavřených profilů je provedeno dle schématu AxBxC (Obr. 13). Další v práci zmíněné profily tohoto typu se budou značit stejným způsobem.



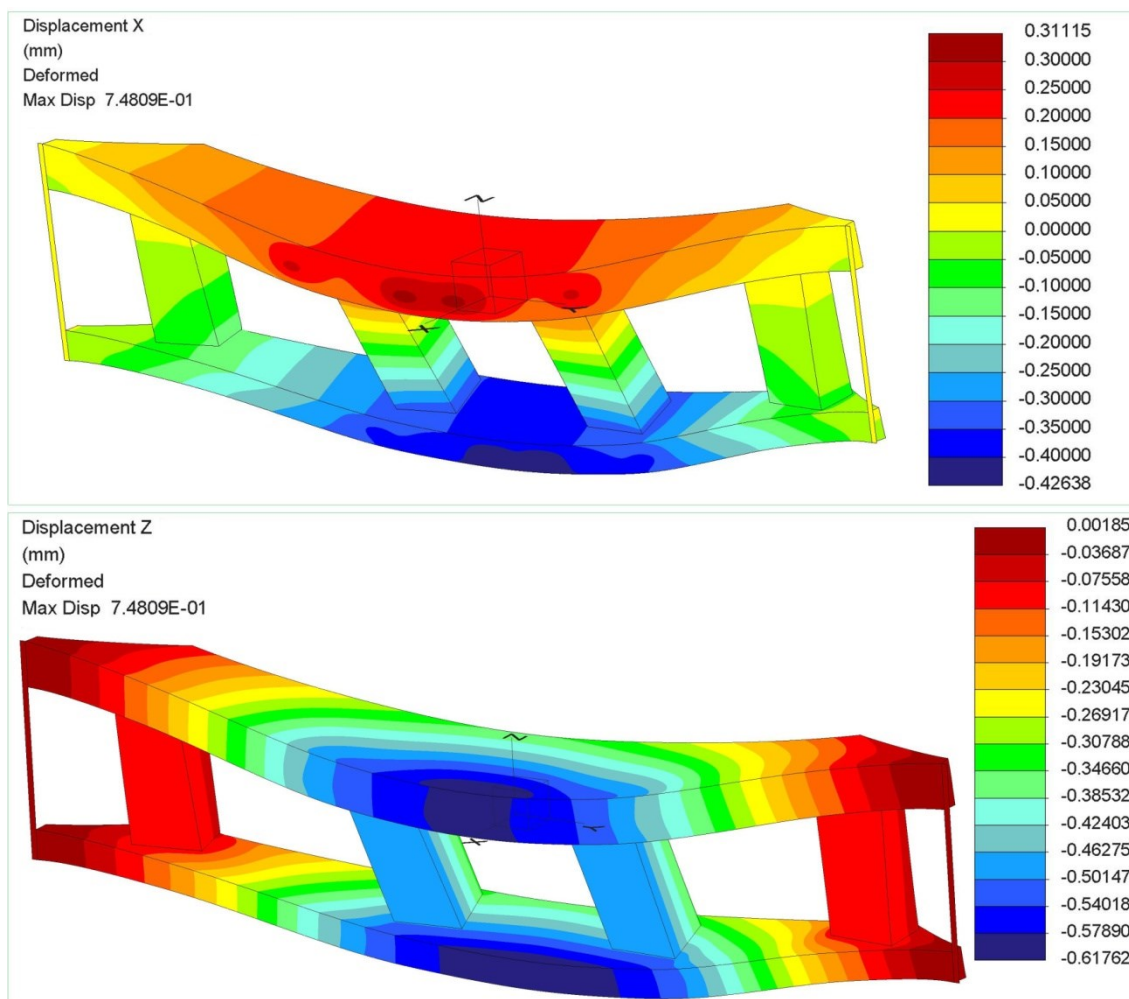
Obr. 13: Značení profilů.



Obr. 14: Rozložení profilů původního řešení.

Řešení	Hmotnost [kg]	Maximální celková deformace [mm]	Maximální deformace X [mm]	Maximální deformace Z [mm]
Původní	436,124	0,7480866	-0,4263849	-0,617616

Tab. 2: Výsledky analýzy původního řešení.



Obr. 15: Deformovaný model původního řešení. Nahoře je zobrazeno posunutí uzlů deformací ve směru x, dole ve směru z.

4.1.3 Skořepinový model varianty 1

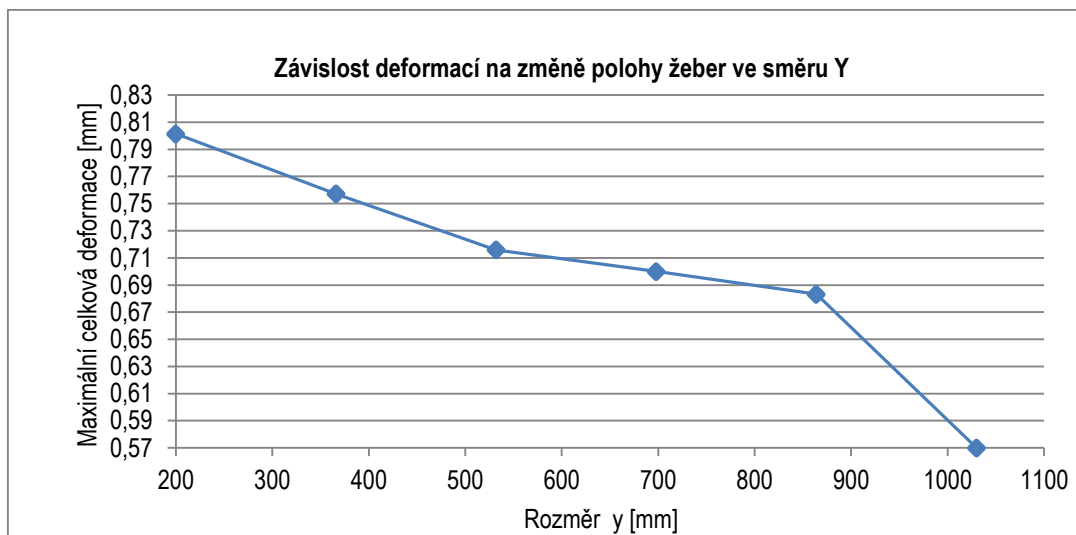
Tato varianta počítá se stejnými profily a počty žeber jako původní varianta. Liší se ale přesunutím prostředních dvou žeber k dvěma krajním. Studie této varianty přinesla poznání, že čím blíže jsou prostřední žebra ke krajním, tím větší je tuhost nosníku (Graf 1). Nejvyšší tuhost pak přinesla varianta s těsně přiloženými nosníky (Obr. 16).

Varianta 1 je složena z těchto profilů:

Horní nosník --> 300x150x8

Spodní nosník --> 250x100x8

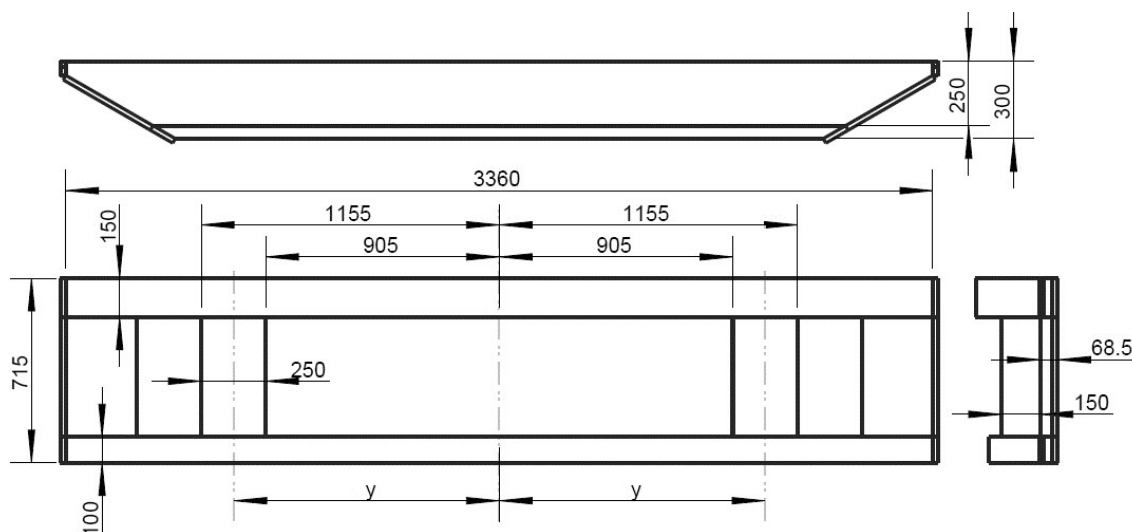
4x Žebro --> 250x150x8



Graf 1: Závislost deformací nosníku na změně polohy žeber ve směru Y při studii optimálního rozmístění žeber na nosníku; rozměr y je zakótován na Obr. 16.

Rozměr y [mm]	200	366	532	698	864	1030
Maximální celková deformace [mm]	0,802696	0,758413	0,717179	0,701188	0,684518	0,571270

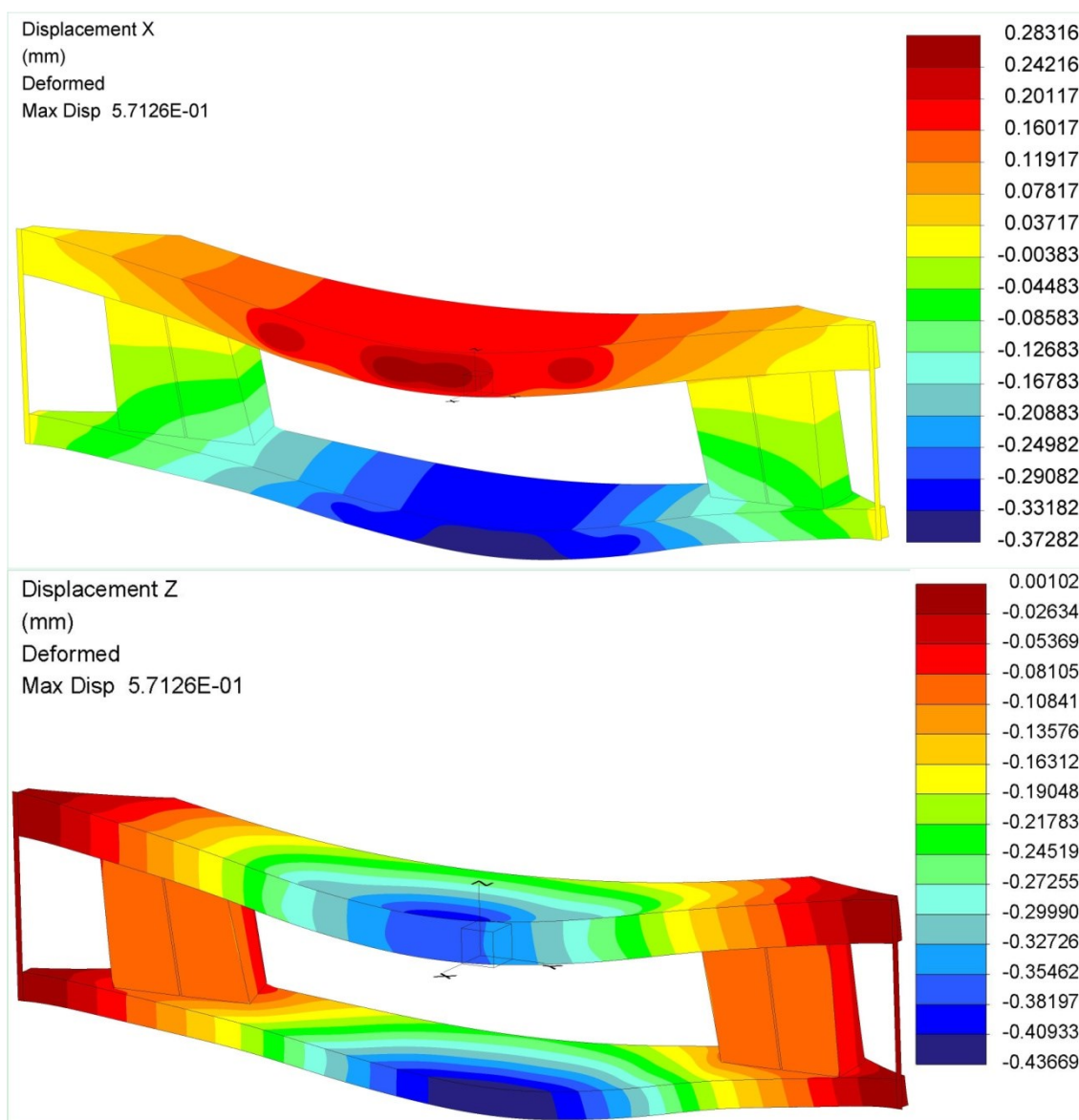
Tab. 3: Hodnoty ke Graf 1.



Obr. 16: Rozložení profilů varianty 1. Na obrázku je zakótován rozměr y použitý v Graf 1 a Tab. 3.

Řešení	Hmotnost [kg]	Maximální celková deformace [mm]	Maximální deformace X [mm]	Maximální deformace Z [mm]
Varianta 1	436,124	0,5712578	-0,3728216	-0,436688

Tab. 4: Výsledky analýzy varianty 1.



Obr. 17: Deformovaný model varianty 1. Nahoře je zobrazeno posunutí uzlů deformací ve směru x, dole ve směru z.

4.1.4 Skořepinový model varianty 2

Varianta 2 je založena na vyztužení konstrukce pomocí přidaného žebra. Toto žebro bylo umístěno do osy nosníku a zbylá žebra rozmístěna podle schématu Obr. 18. Byla provedena citlivostní studie rozmístění žebířů s výsledky na Graf 2 a v Tab. 5. Maximum *rozměru y* bylo v této studii stanoveno na *990 mm*, nicméně v samotné variantě 2 byl použit $y = 1030 \text{ mm}$ po vzoru varianty 1. Následná analýza tohoto řešení ukázala, že tuhost celku se při této změně opravdu zvýší.

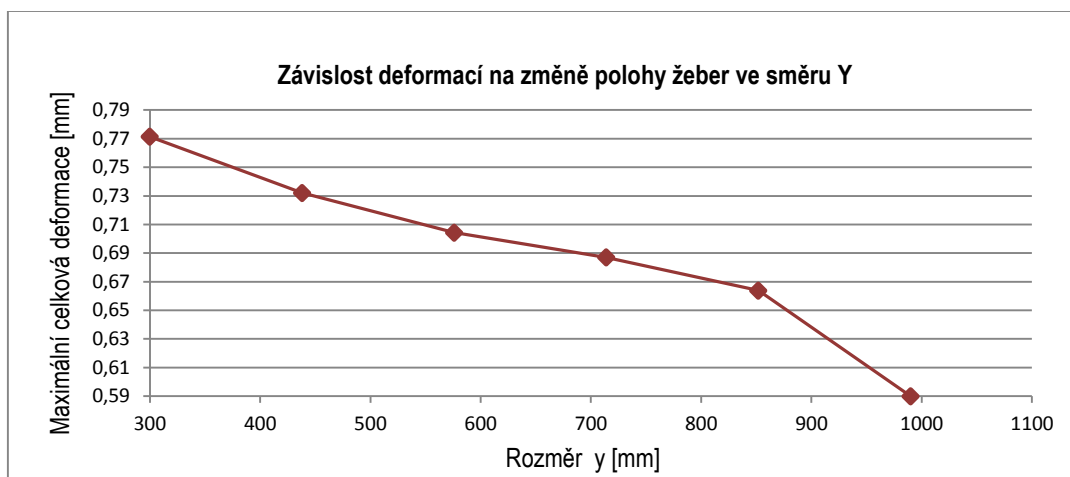
Dále byla pro tuto variantu uskutečněna citlivostní studie změny tloušťky stěny profilu žeber. Tato studie prokázala, že je možné dosáhnout lepší tuhosti ve všech směrech i při snížení hmotnosti soustavy, a to v případě, že $C_z = 5 \text{ mm}$.

Varianta 2 je složena z těchto profilů:

Horní nosník --> 300x150x8

Spodní nosník --> 250x100x8

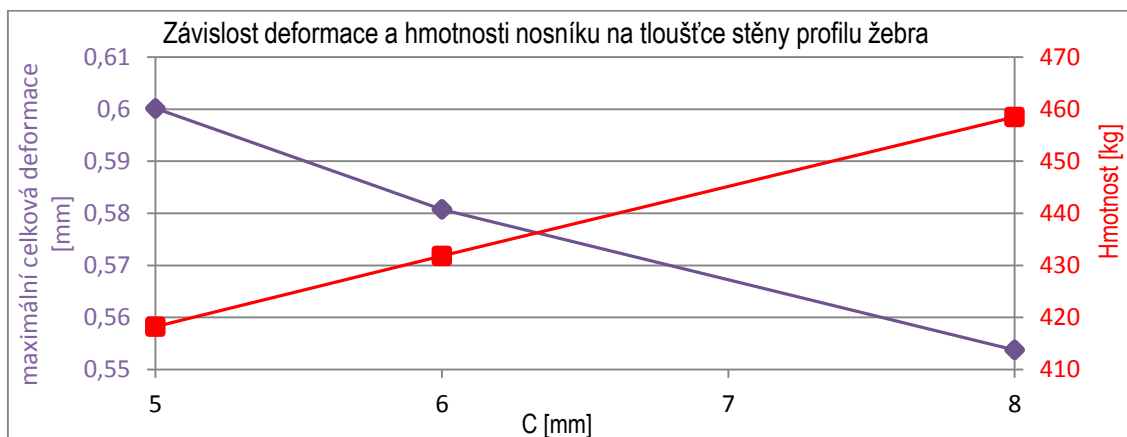
5x Žebro --> 250x150x5



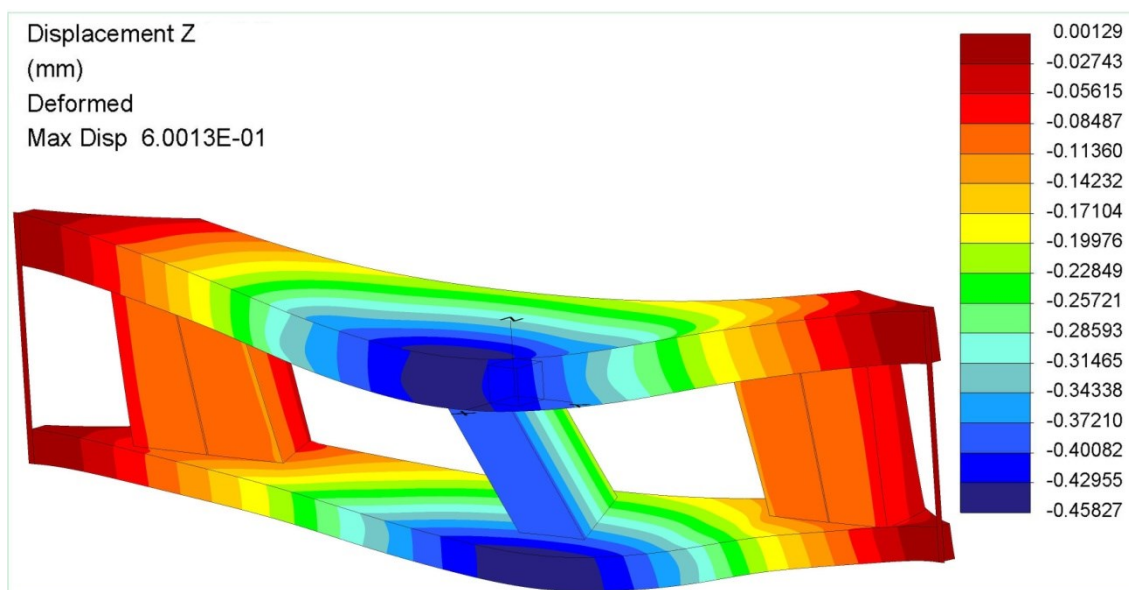
Graf 2: Závislost deformací nosníku na změně polohy žeber ve směru Y při studii optimálního rozmístění žeber na nosníku; *rozměr y* je zakótován na Obr. 18.

Rozměr y [mm]	300	438	576	714	852	990
Maximální celková deformace [mm]	0,774765	0,735441	0,707753	0,690360	0,667254	0,593413
Hmotnost [kg]	458,486					

Tab. 5: Hodnoty ke Graf 2.



Graf 3: Závislost maximální celkové deformace a hmotnosti nosníku na tloušťce stěny profilu žebra.



Obr. 20: Deformovaný model varianty 2. Zobrazeno je posunutí uzlů ve směru z.

4.1.5 Skořepinový model varianty 3

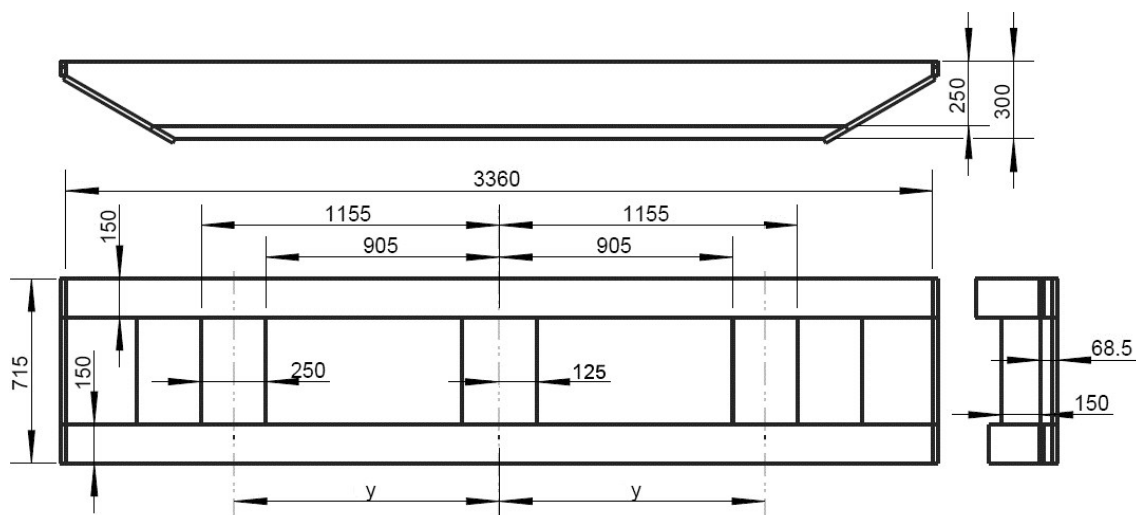
Rozmístění 5 žeber v této variantě bylo provedeno podle varianty 2. Hlavní změna spočívá v zavedení spodního nosníku s větším rozměrem B ($B_s = 150 \text{ mm}$). Podle předpokladu se tím zvětšila celková tuhost, neboť došlo ke zvětšení hmoty na vzdálenějším místě od pomyslného středu natočení nosníku. Zároveň byl zachován rozměr profilu žeber podle původního řešení. Jedná se tedy o nejhmotnější, ale zároveň teoreticky nejtužší vybranou variantu. Výběr použitého spodního nosníku proběhl na základě výsledků studií se 3 žebry. Další variantou by mohla být kombinace horní nosník 300x200x8 a spodní nosník 250x150x8, která by teoreticky mohla vykazovat lepší tuhost, ale v tomto případě by došlo již k přílišnému nárůstu hmoty nosníku.

Varianta 3 je složena z těchto profilů:

Horní nosník --> 300x150x8

Spodní nosník --> 250x150x8

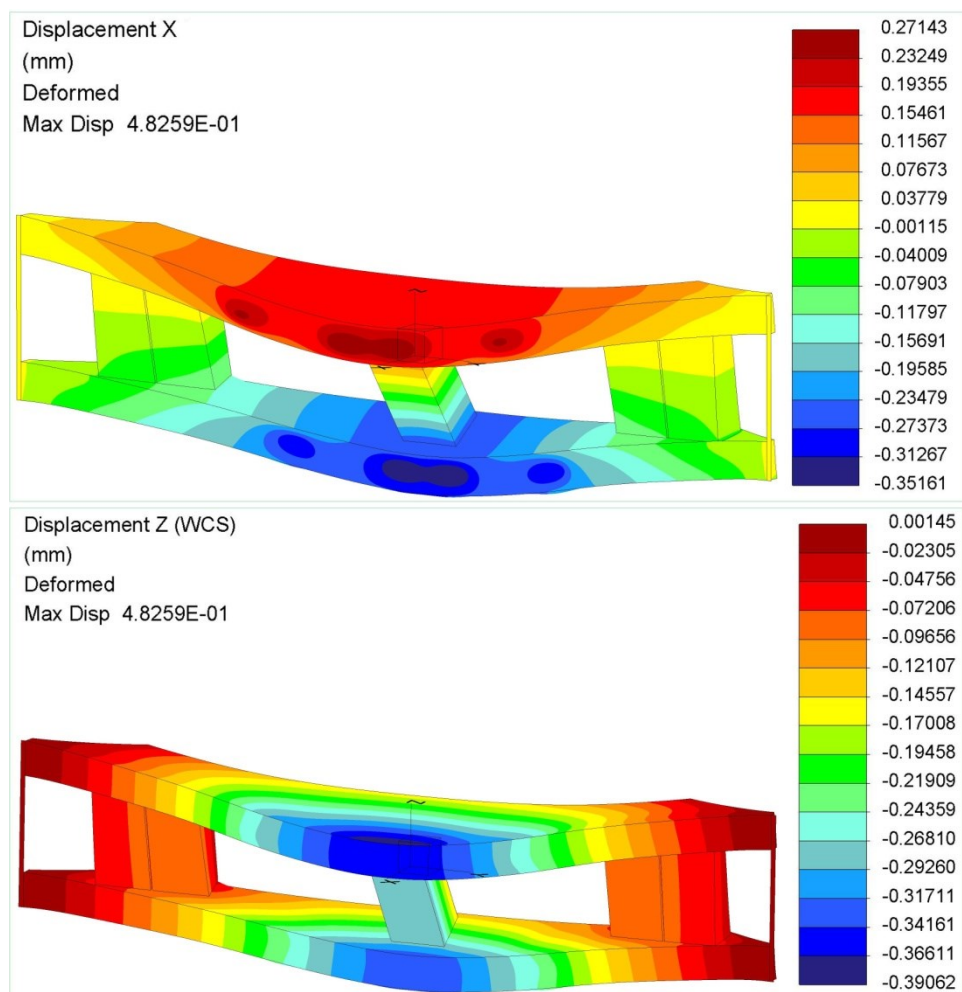
5x Žebro --> 250x150x8



Obr. 21: Rozložení profilů varianty 3.

Řešení	Hmotnost [kg]	Maximální celková deformace [mm]	Maximální deformace X [mm]	Maximální deformace Z [mm]
Varianta 3	472,454	0,482588	-0,351614	-0,390619

Tab. 8: Výsledky analýzy varianty 3.



Obr. 22: Deformovaný model varianty 3. Nahoře je zobrazeno posunutí uzlů deformací ve směru x, dole ve směru z.

4.1.6 Porovnání výsledků analýz skořepinových modelů

$i [-]$	$\Delta c [mm]$	$\Delta x [mm]$	$\Delta z [mm]$	$m [kg]$	$\Delta c_i / \Delta c_0$ [%]	$\Delta x_i / \Delta x_0$ [%]	$\Delta z_i / \Delta z_0$ [%]	m_i / m_0 [%]
0	0,748087	-0,426385	-0,617616	436,124	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,571258	-0,372822	-0,436688	436,124	-23,64	-12,56	-29,29	0,00
2	0,600135	-0,395550	-0,458282	418,218	-19,78	-7,23	-25,80	-4,11
3	0,482588	-0,351614	-0,390619	472,454	-35,49	-17,54	-36,75	8,33
4	0,393890	-0,258200	-0,319957	575,886	-47,35	-39,44	-48,19	32,05
5	0,464207	-0,322776	-0,338152	537,456	-37,95	-24,30	-45,25	23,23
6	0,503478	-0,370777	-0,401549	448,651	-32,70	-13,04	-34,98	2,87
7	0,508324	-0,278829	-0,427006	541,812	-32,05	-34,61	-30,86	24,23
8	0,518288	-0,383982	-0,409400	436,516	-30,72	-9,94	-33,71	0,09
9	0,524224	0,391646	-0,409310	529,201	-29,92	-8,15	-33,73	21,34
10	0,538191	0,388649	-0,429316	490,770	-28,06	-8,85	-30,49	12,53
11	0,538439	0,329545	-0,430245	439,149	-28,02	-22,71	-30,34	0,69
12	0,553754	-0,351140	-0,438887	458,486	-25,98	-17,65	-28,94	5,13
13	0,563546	0,339273	-0,477590	509,400	-24,67	-20,43	-22,67	16,80
14	0,580763	-0,377380	-0,450013	431,815	-22,37	-11,49	-27,14	-0,99
15	0,582426	-0,431170	-0,405879	499,026	-22,14	1,12	-34,28	14,42
16	0,589445	0,405071	-0,479088	495,126	-21,21	-5,00	-22,43	13,53
17	0,594190	0,338739	-0,513251	470,970	-20,57	-20,56	-16,90	7,99
18	0,600926	-0,402760	-0,449703	414,869	-19,67	-5,54	-27,19	-4,87
19	0,606874	-0,356895	-0,500569	502,853	-18,88	-16,30	-18,95	15,30
20	0,607460	-0,436924	-0,452811	452,340	-18,80	2,47	-26,68	3,72
21	0,619923	-0,451135	-0,454905	439,907	-17,13	5,80	-26,35	0,87
22	0,622282	-0,423618	-0,459471	404,023	-16,82	-0,65	-25,61	-7,36
23	0,628587	-0,460524	-0,456744	433,553	-15,97	8,01	-26,05	-0,59
24	0,653520	0,398342	-0,553725	456,168	-12,64	-6,58	-10,34	4,60
25	0,664106	-0,455697	-0,486065	480,249	-11,23	6,87	-21,30	10,12
26	0,679020	-0,448497	-0,557419	432,540	-9,23	5,19	-9,75	-0,82
27	0,694489	-0,454103	-0,551438	405,450	-7,16	6,50	-10,72	-7,03
28	0,701353	0,358636	-0,624769	475,326	-6,25	-15,89	1,16	8,99
29	0,709354	-0,466025	-0,538138	433,563	-5,18	9,30	-12,87	-0,59
30	0,738525	0,525910	-0,586007	400,719	-1,28	23,34	-5,12	-8,12
31	0,764261	-0,447305	-0,623174	422,498	2,16	4,91	0,90	-3,12
32	0,769537	-0,452041	-0,625738	414,869	2,87	6,02	1,32	-4,87
33	0,784871	-0,468830	-0,632406	404,023	4,92	9,95	2,39	-7,36
34	0,788236	-0,362255	-0,706811	436,367	5,37	-15,04	14,44	0,06
35	0,829820	-0,479814	-0,680729	413,763	10,93	12,53	10,22	-5,13

36	0,846796	-0,501092	-0,686391	397,923	13,19	17,52	11,14	-8,76
37	0,859066	-0,515038	-0,691380	389,829	14,84	20,79	11,94	-10,62
38	0,876394	0,681908	-0,704168	386,877	17,15	59,93	14,01	-11,29
39	0,919939	0,707181	-0,803258	370,523	22,97	65,86	30,06	-15,04
40	0,932332	-0,565653	-0,758527	402,425	24,63	32,66	22,82	-7,73
41	0,993611	-0,513259	-0,890444	397,408	32,82	20,37	44,17	-8,88
42	1,087060	-0,688303	-0,889079	385,576	45,31	61,43	43,95	-11,59
43	1,144873	-0,922146	-0,807398	348,009	53,04	116,27	30,73	-20,20
44	1,181330	-0,917794	-0,867439	374,895	57,91	115,25	40,45	-14,04

Tab. 9: Kompletní tabulka výsledků deformací (posunutí uzlů) a hmotností pro všechny počítané varianty. Tabulka informuje o absolutních hodnotách posunutí uzlů a hmotností, jakož i o procentuálním přírůstku vzhledem k původnímu řešení. Varianty jsou řazeny dle Δ_c od nejmenšího po největší. Zeleně jsou vyznačeny další příznivé varianty.

Veličiny v tabulce:

i --> Číslo varianty; [-]

Δ_c --> Celkové posunutí uzlu; [mm]

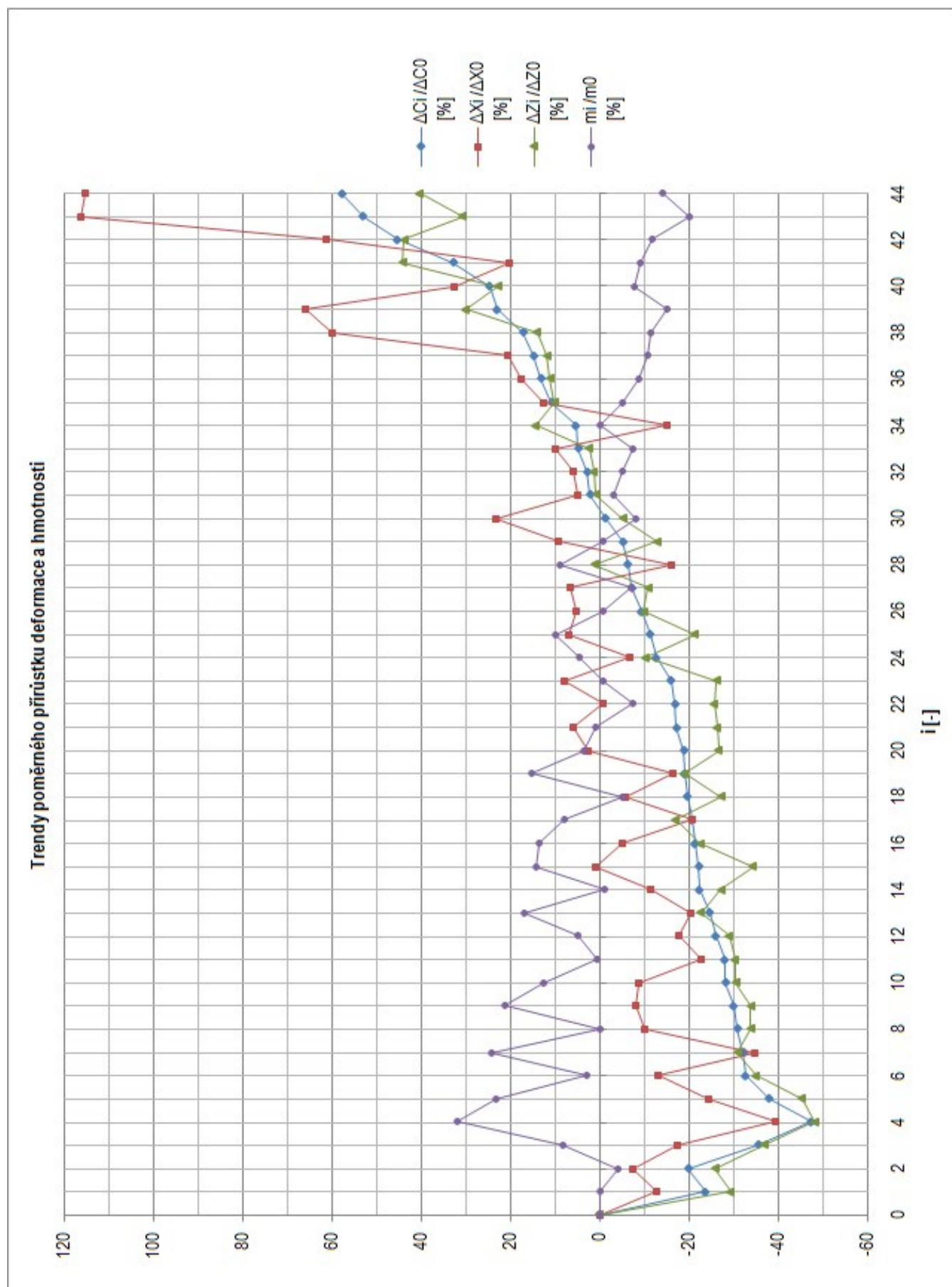
Δ_x --> Posunutí uzlu ve směru X; když je záporné, globální extrém byl naměřen na spodním nosníku, když kladné, globální extrém byl naměřen na horním nosníku; [mm]

Δ_z --> Posunutí uzlu ve směru Z; [mm]

m --> Hmotnost skořepinového modelu; [kg]

Δ_i/Δ_0 --> Poměrný přírůstek deformací; příslušný index značí směr deformací a číslo varianty; [%]

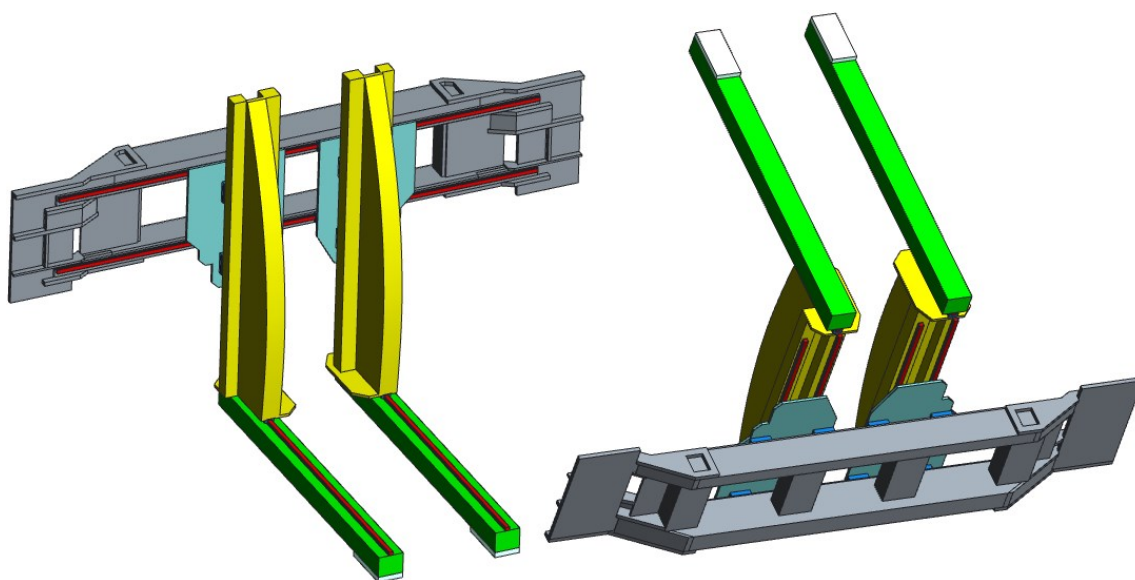
m_i/m_0 --> Poměrný přírůstek hmotnosti; příslušný index značí číslo varianty; [%]



Graf 5: Graf porovnání poměrných přírůstků deformace a hmotností všech počítaných variant dle Tab. 9.

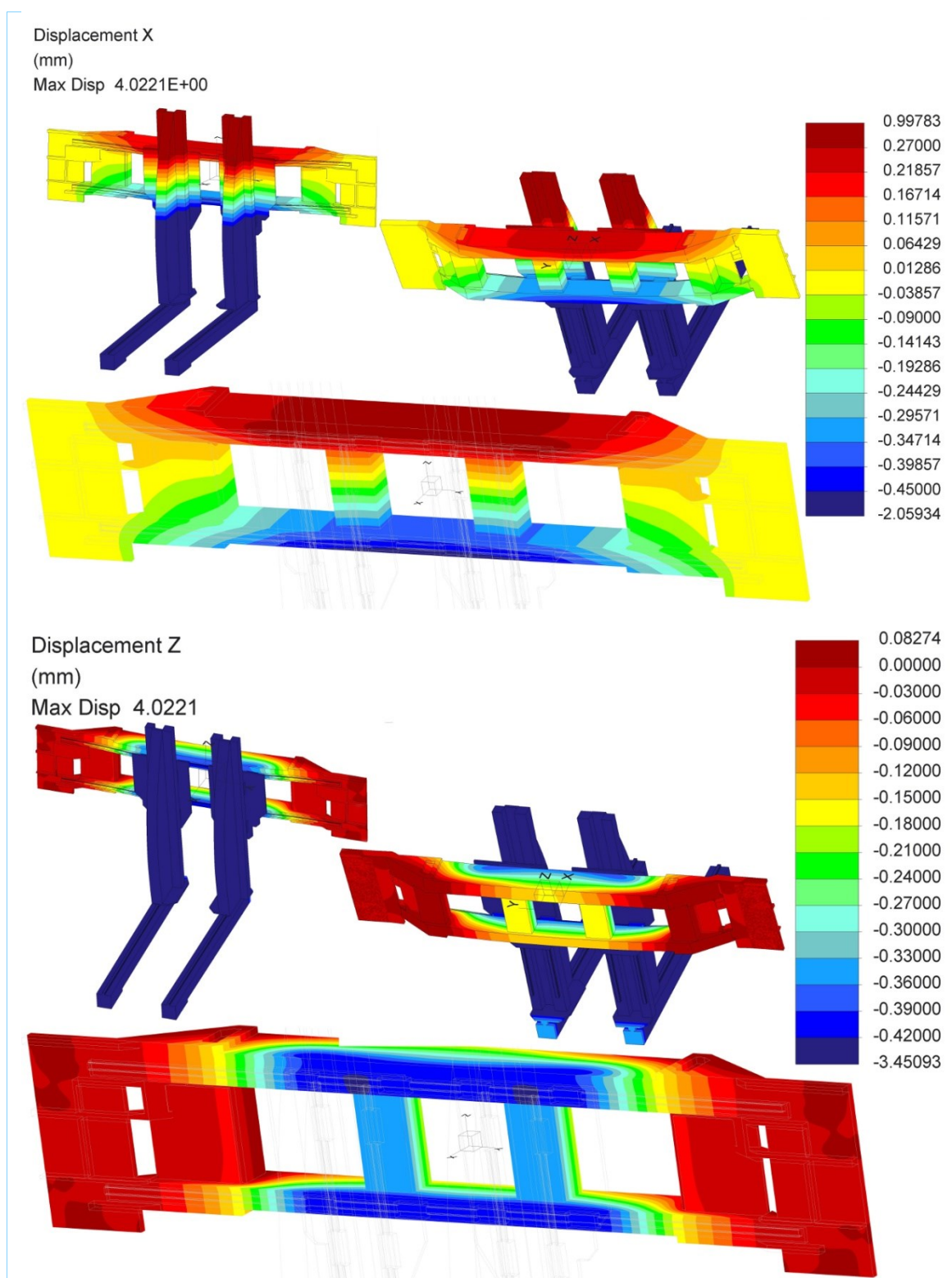
4.2. Objemový model

Další krok práce je ověření výsledků analýz skořepinových modelů pomocí analýzy přesnějších objemových modelů s reálnějším modelem zatížení. Zatížení je tentokrát řešeno pouze jako působení tíhového zrychlení na náhradní model obsahující náhradní modely všech částí zakladače. Geometrie os X a Z a vozíku Y-Z byla velmi zjednodušena se zachováním hlavních rozměrů. Bylo proto nutné vykompenzovat změnu objemu částí přiřazením fiktivní hustoty materiálu k jednotlivým modelům tak, aby se jejich hmotnost co nejvíce přiblížila hmotnosti skutečných částí. Dále byl u všech částí kromě nosníku definován Youngův modul $E = 10^6 \text{ GPa}$ pro umělé zvýšení tuhosti zbytku sestavy. Toto opatření bylo učiněno s cílem sledování posunutí na konci osy X bez ovlivnění deformacemi částí zakladače. Modely lineárních vedení byly ponechány beze změn. Skutečný vozík lineárního vedení disponuje řetězcem kuliček, které slouží k přenosu pohybu, a které mají při tomto pohybu styk s lineárním vedením. Zde byl tento styk změněn na styk dvou ploch, což by mohlo zvýšit tuhost celku, nicméně sledujeme pouze tuhost nosníku, takže je toto opatření přijatelné. Zatížení na konci osy X způsobené uchopovacím zařízením a polotovarem jím uchopeným bylo stanoveno na 90 kg , a zde bylo nahrazeno náhradním modelem tvaru desky s definovanou fiktivní hustotou. Ze samotného modelu nosníku byla odstraněna zaoblení a malé plošky, které zbytečně navyšují počet prvků a mohou způsobovat singularity ve výsledcích.

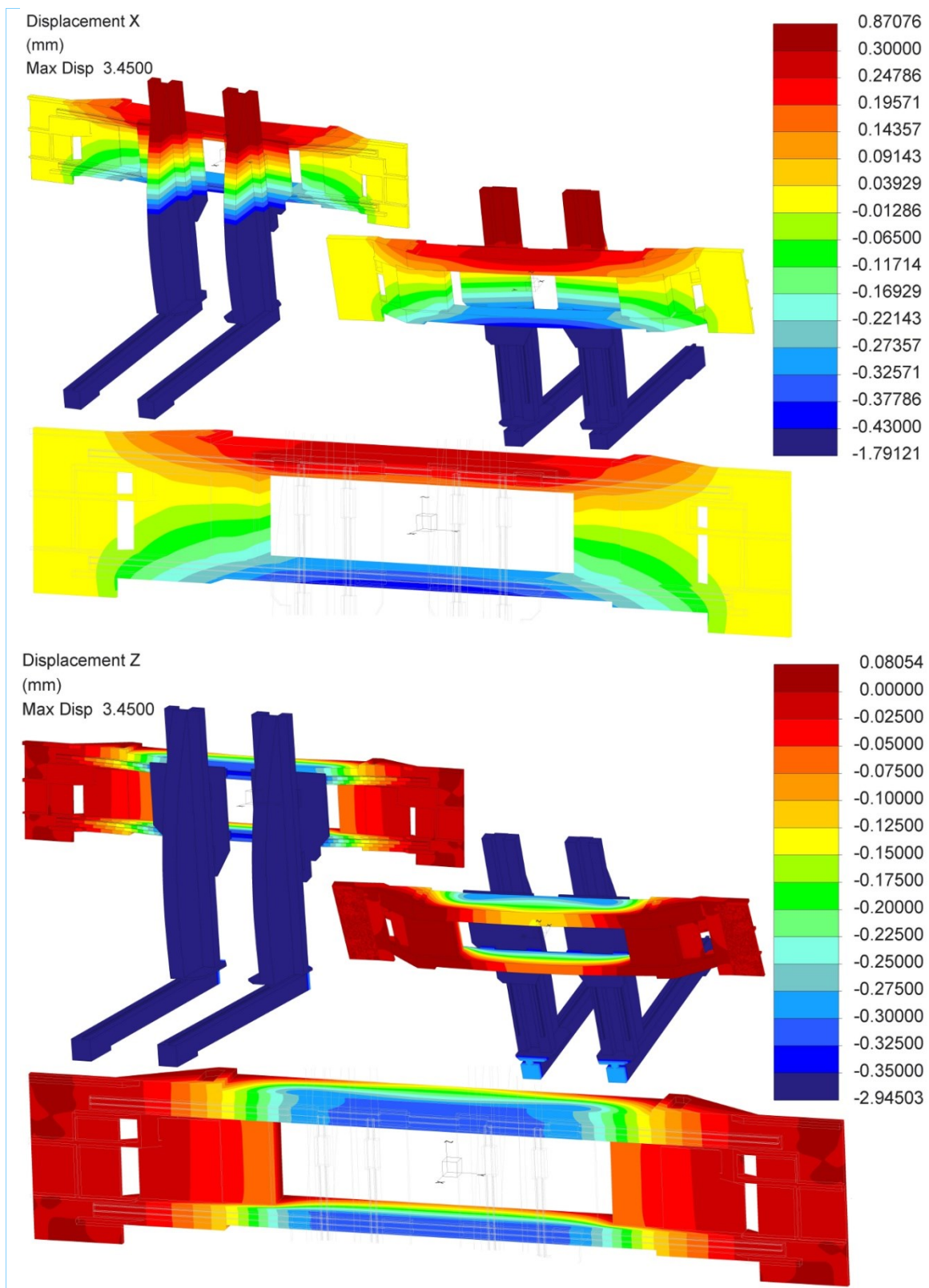


Obr. 23: Náhradní model sestavy zakladače.

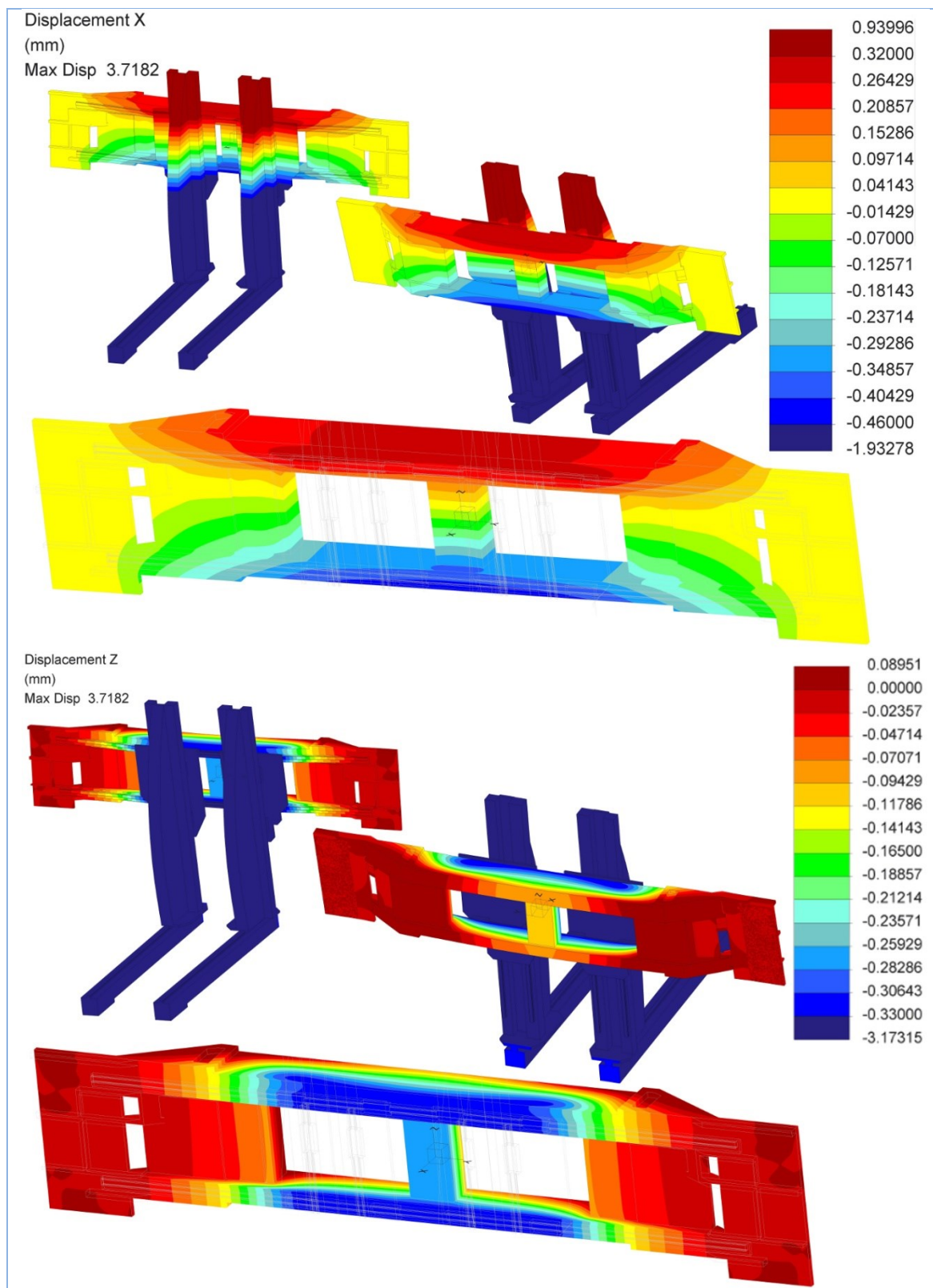
4.2.1 Výsledky analýz objemových modelů pro všechny varianty



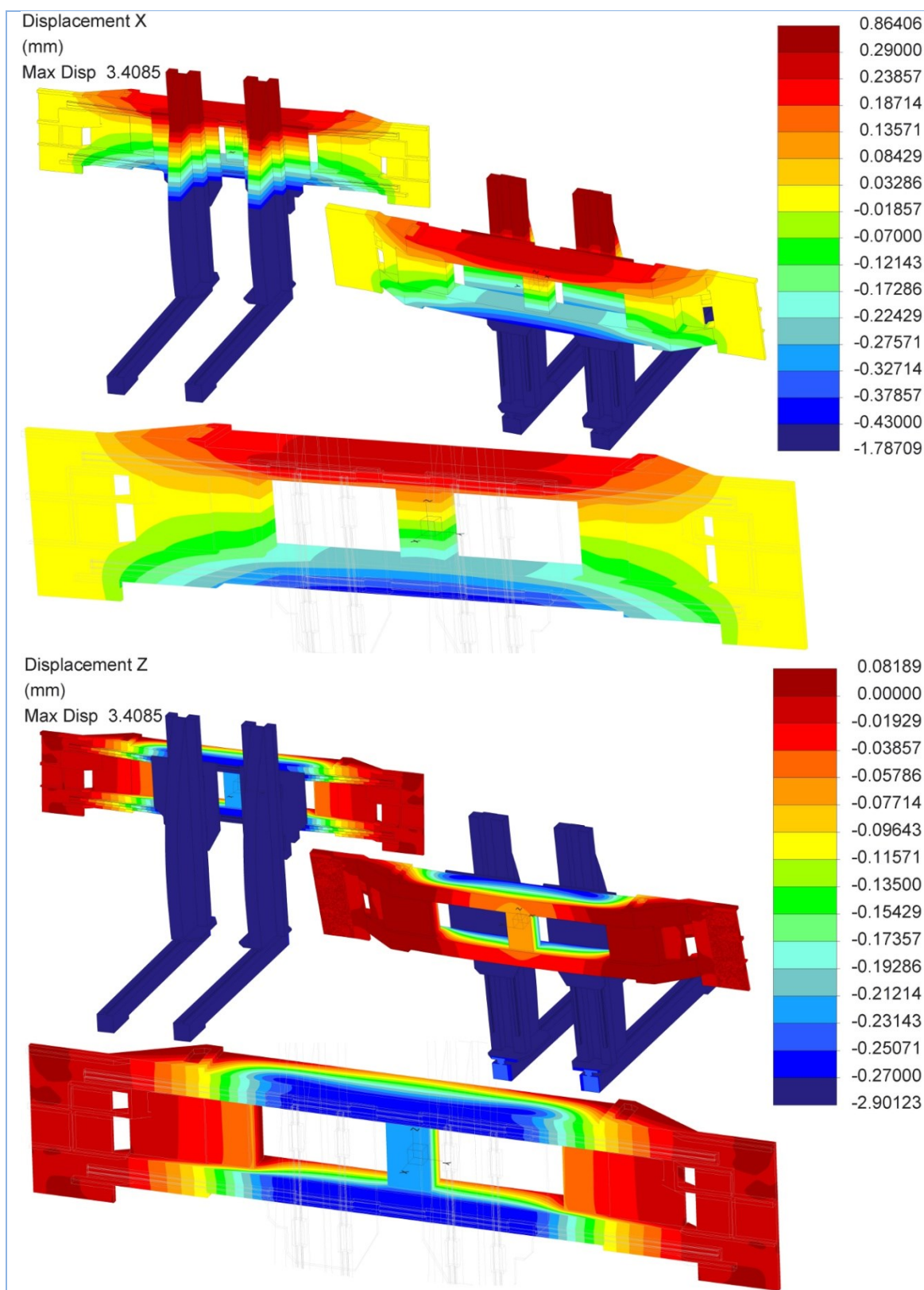
Obr. 24: Vizualizace posunutí uzlů pro původní řešení; nahoře ve směru X; dole ve směru Z. Stupnice jsou upraveny podle extrémů hodnot naměřených na modelu osy y dole uprostřed u zobrazení jednotlivých směrů.



Obr. 25: Vizualizace posunutí uzlů pro variantu 1; nahoře ve směru X; dole ve směru Z. Stupnice jsou upraveny podle extrémů hodnot naměřených na modelu osy y dole uprostřed u zobrazení jednotlivých směrů.



Obr. 26: Vizualizace posunutí uzlů pro variantu 2; nahoře ve směru X; dole ve směru Z. Stupnice jsou upraveny podle extrémů hodnot naměřených na modelu osy y dole uprostřed u zobrazení jednotlivých směrů.

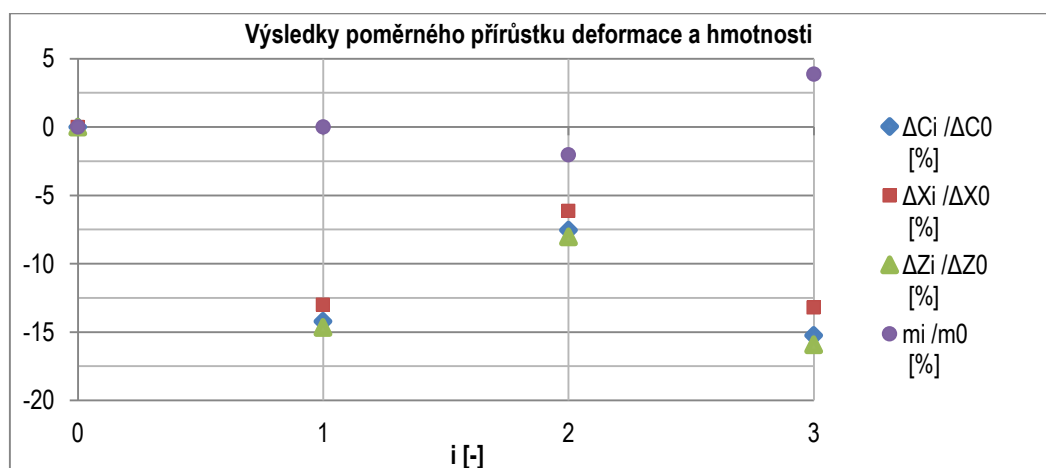


Obr. 27: Vizualizace posunutí uzlů pro variantu 3; nahoře ve směru X; Stupnice jsou upraveny podle extrémů hodnot naměřených na modelu osy y dole uprostřed u zobrazení jednotlivých směrů.

Za konečné výsledky deformací získaných z analýz objemových modelů bude považováno maximální posunutí uzlů celkové, ve směru X a ve směru Z. Tato posunutí se na modelech objevují v místě uchopovacího zařízení na konci osy X a z hlediska praxe nás zajímají nejvíce.

i [-]	Δ_c [mm]	Δ_x [mm]	Δ_z [mm]	m [kg]	Δ_{Ci}/Δ_{C0} [%]	Δ_{Xi}/Δ_{X0} [%]	Δ_{Zi}/Δ_{Z0} [%]	m_i/m_0 [%]	Cena [Kč]
0	4,0221	-2,0592	-3,4509	858,517	0,00	0,00	0,00	0,00	115899,80
1	3,4500	-1,7912	-2,9450	858,517	-14,22	-13,01	-14,66	0,00	115899,80
2	3,7182	-1,9328	-3,1732	839,243	-7,56	-6,14	-8,05	-2,25	113297,80
3	3,4085	-1,7871	-2,9012	893,374	-15,26	-13,21	-15,93	4,06	120605,50

Tab. 10: Výsledky analýz objemových modelů. Hodnoty deformací jsou globální extrémy naměřené na objemovém modelu. Hmotnost a cena jsou vázány pouze na hlavní nosník (osu Y), kde jednotková cena je 135 Kč/kg.



Graf 6: Poměrný přírůstek deformace a hmotnosti dle Tab. 10.

Maximální zlepšení v oblasti tuhosti poskytuje varianta 3, nicméně pokud budeme uvažovat pouze v desetinách mm, varianta 1 a varianta 3 vykazují shodné výsledky. V oblasti hmotnosti ale varianta 3 vykazuje nárůst o 34,9 kg. Praxí je v Benteleru určena cena za 1kg hotového výrobku z oceli ve výši 135 Kč (započítávají se čisté náklady za polotovary i následné technologické operace, jako zde sváření a obrábění). Varianta 3 by pak vyšla o cca 4700 Kč dražší. Varianta 2 pak vykazuje nižší deformace ve všech směrech zároveň s úbytkem hmotnosti, což by v konečném důsledku mělo za následek snížení ceny o cca 2600 Kč (snížení hmotnosti o 19,3 kg). Varianta 2 je tedy nejvhodnější z uvedených variant pro převedení do praxe, neboť po konzultaci s konzultantem se dospělo k závěru, že dosažená zvýšení tuhosti by neměla větší dopad na přesnost výroby.

4.2.2 Porovnání výsledků analýz objemových a skořepinových modelů

Při porovnávání těchto výsledků je důležité, aby byly porovnávány hodnoty naměřené na stejném místě modelu. Číselné hodnoty posunutí uzlů na skořepinových modelech jsou globální extrémy na nich naměřené. Extrémy na objemových modelech se ale nacházely na jiném místě, proto bylo nutné použít funkci Dynamic query (modul Simulate Results), která umožňuje zobrazit hodnotu zvolené veličiny pro libovolný bod vykresleného modelu včetně zobrazení souřadnic tohoto bodu. Díky shodnému umístění souřadnicových systémů obou modelů tak bylo možné mezi nimi porovnávat hodnoty deformací ve stejných bodech. Výsledkem je tabulka (Tab. 11) ukazující hodnoty posunutí pro horní a spodní nosník v místech, kde byly na skořepinovém modelu naměřeny lokální extrémy zvolených veličin.

$i [-]$	Skořepinový model				Objemový model				Objemový/ Skořepinový [%] pro			
	Δ_{HNX} [mm]	Δ_{SNX} [mm]	Δ_{HNZ} [mm]	Δ_{SNZ} [mm]	Δ_{HNX} [mm]	Δ_{SNX} [mm]	Δ_{HNZ} [mm]	Δ_{SNZ} [mm]	Δ_{HNX}	Δ_{SNX}	Δ_{HNZ}	Δ_{SNZ}
0	0,3112	-0,4264	-0,6095	-0,6176	0,2608	-0,4445	-0,3712	-0,4132	-16,20	4,24	-39,10	-33,10
1	0,2832	-0,3728	-0,3995	-0,4367	0,2266	-0,3807	-0,2551	-0,2872	-19,99	2,12	-36,15	-34,23
2	0,2839	-0,3955	-0,4583	-0,4548	0,2461	-0,4091	-0,2860	-0,3198	-13,31	3,44	-37,60	-29,68
3	0,2714	-0,3516	-0,3906	-0,3460	0,2320	-0,3449	-0,2343	-0,2302	-14,52	-1,91	-40,02	-33,47

Tab. 11: Výsledky deformací z analýz skořepinových i objemových modelů a poměrný přírůstek deformace (Objemový/ Skořepinový). Z tabulky plyne, že celková teoretická tuhost nosníku se zavedením objemového modelu zvedla, přičemž deformace se snížily v řádu desítek procent. Výjimkou je ovšem deformace spodního nosníku, která se v prvních třech variantách zvětšila v řádu procent.

$i [-]$	Souřadnice X; Y; Z [mm] pro			
	Δ_{HNX}	Δ_{SNX}	Δ_{HNZ}	Δ_{SNZ}
0	150; 102; 337	150; 100; -266	103; 26; 410	150; 0; -301
1	150; 103; 336	150; 97; -262	83; -1; 410	137; 40; -305
2	150; -107; 336	150; -97; -262	104; 29; 410	150; 0; -298
3	150; -107; 337	150; 107; -233	97; 27; 410	117; -60; -305

Tab. 12: Souřadnice X, Y, Z bodů pro měření posunutí uzlů v jednotlivých směrech na skořepinovém a objemovém modelu.

Veličiny v tabulkách:

Δ_{HNX} -> Posunutí uzlů ve směru X na horním nosníku v určeném bodě;

Δ_{SNX} -> Posunutí uzlů ve směru X na spodním nosníku v určeném bodě;

Δ_{HNZ} -> Posunutí uzlů ve směru Z na horním nosníku v určeném bodě;

Δ_{SNZ} -> Posunutí uzlů ve směru Z na spodním nosníku v určeném bodě;

Δ_{Xmax} -> Maximální posunutí uzlů ve směru X na objemovém modelu (v místě uchopovacího zařízení);

Δ_{Zmax} -> Maximální posunutí uzlů ve směru Z na objemovém modelu (v místě uchopovacího zařízení);

Přechod na objemový model a věrohodnější model zatížení vykázal zvýšení tuhosti prakticky na celé ose Y s výjimkou jejího spodního nosníku. Toto je nejspíš způsobeno vyztužením pomocí vozíků Y-Z. Průměrně se snížily deformace na horním nosníku ve směru X o 16%, na horním nosníku ve směru Z o 38% a na spodním nosníku ve směru Z o 32%. Naopak průměrné zvýšení deformací bylo zaznamenáno na spodním nosníku ve směru X o 2%. Konkrétní výsledky jsou k vidění výše (Tab. 11).

Závěr

Na počátku práce byla provedena analýza původního řešení nosníku na zjednodušeném skořepinovém modelu. Poté bylo postupně zanalyzováno 44 variant různých konfigurací dílů nosníku, ze kterých byly závěrem vybrány 3 varianty jako optimální. Nové varianty byly tvořeny s ohledem na výsledky předchozích. Výsledky analýz na skořepinových modelech ukázaly 3 závěry:

- 1) Lze dosáhnout zvýšení tuhosti pouhou změnou geometrie.
- 2) Kombinací přidání hmoty a změny geometrie je možné tuhost zvýšit ještě více.
- 3) Výraznějším snížením hmoty nelze dosáhnout uspokojivé tuhosti.

Následná kontrola výsledků na složitějším výpočtovém modelu však přinesla vyrovnání hodnot deformací, a nově vzniklé rozdíly oproti původnímu řešení by v praxi neměly valný užitek. Byla ovšem zvolena varianta, jež by v praxi měla přínos snížení hmotnosti a zároveň mírného zvýšení tuhosti (pro stroj nevýznamné), což by ušetřilo náklady za pořízení nosníku. Poznatky získané v analýzách jsou navíc použitelné v budoucnu při návrhu nových součástí. Dále jakékoliv zvýšení tuhosti nosníku, potažmo celku by v praxi mělo za následek potlačení vznikajících vibrací.

Seznam použitých zdrojů

(1) *Návod k obsluze: Feeder*. Liberec: Benteler Maschinenbau CZ s.r.o., 2013. 65 s.

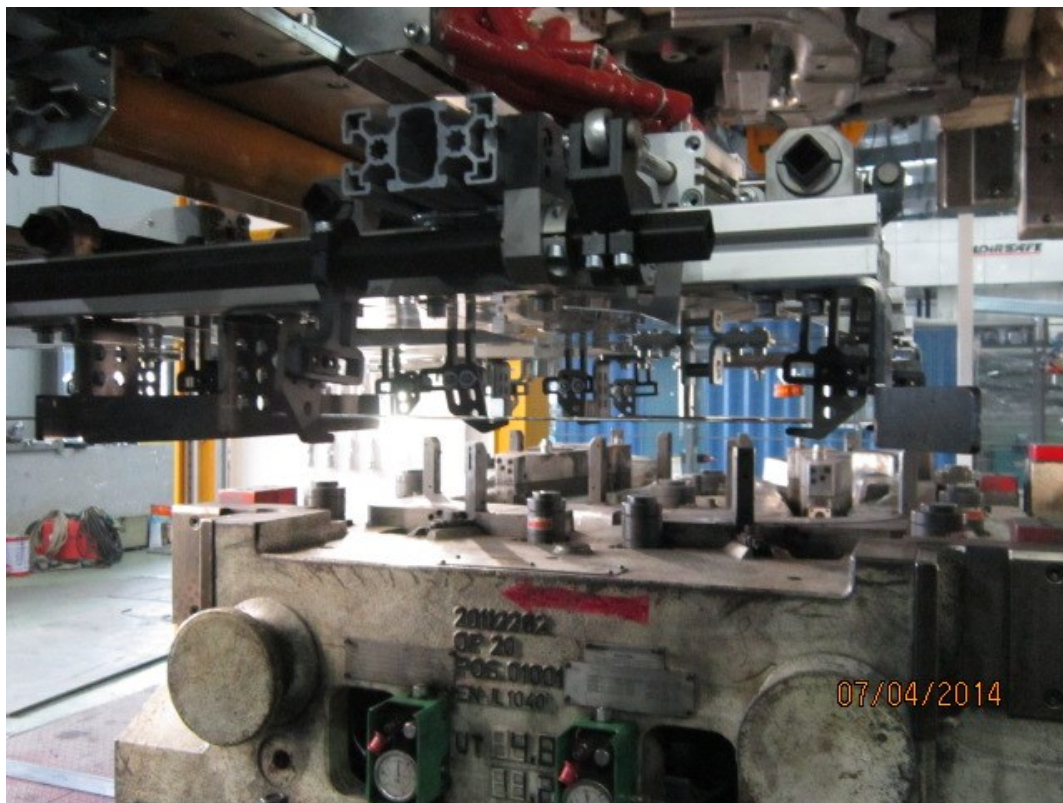
(3) SHIH, Randy H. *Introduction To Finite Element Analysis Using Creo Simulate 1.0*. SDC Publications, 2011. 424 s. ISBN 1585036706.

(2) VRBKA, Martin – VAVERKA, Michal. *Metoda konečných prvků: 1. přednáška – Úvod* [online]. 2.10.2006. <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf>

JULIŠ, K. – BREPTA, R. *Mechanika I. díl (Statika a kinematika)*. SNTL, 1986. 480 s. ISBN 04-224-86.

BRÁT, V – ROSENBERG, J. – JÁČ, V. *Kinematika*. SNTL/ALFA, 1987. 256 s. ISBN 04-224-87.

Přílohy



Obrázky ukazují vzhled formy pro lisování. Horký polotovár je pouštěn z výšky na usazovací čepy. Uchopovací zařízení pracuje s přesností na 2 mm stranového posunu.